

PEDRO HEUSI TAGLIARI

ANÁLISE PRELIMINAR DE TRAÇADO DE TÚNEIS UTILIZANDO TECNOLOGIA BIM

FLORIANÓPOLIS

2018

PEDRO HEUSI TAGLIARI

ANÁLISE PRELIMINAR DE TRAÇADO DE TÚNEIS UTILIZANDO TECNOLOGIA BIM

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do diploma de graduação do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr.

FLORIANÓPOLIS

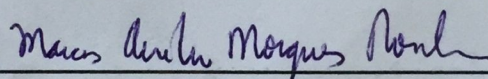
2018

PEDRO HEUSI TAGLIARI

ANÁLISE PRELIMINAR DE TRAÇADO DE TÚNEIS UTILIZANDO TECNOLOGIA BIM

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do diploma de graduação do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho aprovado. FLORIANÓPOLIS, 23 de novembro de 2018:



Prof. Marcos Aurélio Marques
Noronha, Dr.
Orientador

Prof. Dra.

Cristine do Nascimento Mutti

Dra.

Lidiani Cristina Pierri

Dr.

Rafael Pacheco dos Santos

FLORIANÓPOLIS
2018

Agradecimentos

Agradeço a o apoio incondicional de meus pais e familiares. Sem o mesmo não seria possível chegar onde cheguei.

Ao professor Marcos Aurélio Marques Noronha pela orientação e por sempre se mostrar disposto a auxiliar em todos os momentos do trabalho.

Aos colegas de trabalho do LabFSG, CORE e RKS. Seus ensinamentos foram vitais para a formação de um pensamento crítico mais aguçado e sua amizade ficará pra sempre na memória.

A todos os colegas graduandos, em especial os estudantes Lucas Franco Maia, Júlia May Vendrami, Thamiryz Luyze Vieira e Verônica Martins Gnecco. Vocês enriqueceram esta experiência e a tornaram muito mais agradável.

A todos que de alguma forma contribuíram tanto para elaboração do TCC quanto a formação em geral, muito obrigado!

Resumo

A escolha de traçado de túneis é ainda hoje majoritariamente conduzida através do critério de menor comprimento total. Aspectos geotécnicos que influenciam diretamente os custos totais da obra, exigindo por vezes mais reforço nas estruturas de suporte da escavação, são muitas vezes menosprezados. Nesta lógica não é incomum obter traçados mais onerosos, por mais que os túneis sejam mais curtos. Este trabalho propõe uma metodologia para investigação de traçados de túneis utilizando-se de ferramentas baseadas em tecnologia BIM e levando em conta os aspectos geotécnicos do terreno. O modelo proposto é simples e versátil, sendo capaz de gerar com agilidade uma estimativa de quantitativos-chave que impactam fortemente a rentabilidade do projeto. O foco do trabalho são túneis rodoviários, porém, uma lógica semelhante a aqui apresentada pode ser replicada para outros tipos de túnel. Um exemplo de aplicação é exposto e seus resultados comentados e analisados. Discutem-se também as dificuldades encontradas em se aplicar metodologia BIM a obras de infraestrutura e as perspectivas de mudança que tal ferramenta pode proporcionar quando incorporada à rotina do setor de projeto e execução de túneis.

Palavras-chave: BIM; TIM; Tûneis; Escolha de traçado

Abstract

To this date, the decision process for selecting a tunnel alignment is still mostly driven by the criterion of shortest total length. On the other hand, geotechnical aspects that directly influence the overall costs are frequently underestimated. As a consequence, designers fail to take into account expenses related to the supporting structures when analysing the available options. Following this logic it is not uncommon to opt for more expensive alignments, even if they have the shortest paths. This work proposes a methodology for investigating tunnel alignments' options using tools based on BIM technology and taking into account the geotechnical aspects of the terrain. The proposed model is simple and versatile, allowing to quickly generate an estimation of key materials' quantities that strongly impact the profitability of a project. Its scope is mainly focused on road tunnels, however the same approach can be adapted for other types of tunnels. An example of the methodology being applied is presented and the obtained results are commented and analyzed. The difficulties encountered in applying BIM methodology to infrastructure projects are also a topic of discussion, as are perspectives of change that such tool can provide when incorporated into the routine of tunnel designing and construction.

Keywords: BIM; TIM; Tunnels; Tunnel Alignment

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ciclo de vida da edificação e o BIM	23
Figura 2 – A curva de MacLeamy	25
Figura 3 – Lacunas de informação a cada fase de projeto	26
Figura 4 – Características macro por tipo de estrutura	29
Figura 5 – Custo de construção x Percentual gasto com levantamentos geotécnicos	30
Figura 6 – Sistemas de aconragem de tirantes	33
Figura 7 – Sistemas de atuação dos tirantes: individual (esquerda) e em grupo (direita)	33
Figura 8 – Configurações de posicionamento de tirantes	34
Figura 9 – Túnel reforçado com cambotas	34
Figura 10 – Efeito da distribuição de esforços nas cambotas metálicas	35
Figura 11 – Processos de aplicação de concreto projetado	36
Figura 12 – Representação da execução de enfilagens em uma obra de túnel	36
Figura 13 – Sistema de injeção de grout por válvulas manchete	37
Figura 14 – Diagrama de Barton. Suportes baseados na classificação Q	40
Figura 15 – Estabilidade da frente de escavação. Pontos brancos representam dados de túneis e pontos pretos dados de minas	41
Figura 16 – Correlações entre notas e parâmetros	42
Figura 17 – Plano de trabalho	45
Figura 18 – Exemplo de projeto desenvolvido em Revit	48
Figura 19 – Exemplo de código desenvolvido em Dynamo	49
Figura 20 – Geometria da seção transversal	52
Figura 21 – Seção do túnel e seção deslocada modificada	53
Figura 22 – Opções de distribuições de tirantes ao longo da seção	54
Figura 23 – Tirantes distribuídos ao longo do alinhamento do túnel	55
Figura 24 – Parâmetros dos perfis metálicos W de abas paralelas	56
Figura 25 – Posicionamento e geometria das cambotas na seção do túnel	56
Figura 26 – Ângulo de inserção das enfilagens γ com relação ao alinhamento do túnel	57
Figura 27 – Vista isométrica do modelo	58
Figura 28 – Fragmentos do código desenvolvido	59
Figura 29 – Comparação entre a seção original do projeto (esquerda) e a seção equivalente adotada seguindo a parametrização de Kolymbas (direita) .	62
Figura 30 – Pré-visualização do modelo do túnel obtido com a aplicação desenvolvida	63
Figura 31 – Recomendações para uso das tabelas de determinação do suporte pro- postas por Barton	80

Lista de tabelas

Tabela 1 – Descrição e valores para os parâmetros de entrada do método Q	39
Tabela 2 – Categorias de maciço propostas por Barton, Lien e Lunde (1974)	40
Tabela 3 – Fator ESR para obtenção da dimensão equivalente do túnel	41
Tabela 4 – Sistema de pontuação do método RMR	43
Tabela 5 – Classificação do maciço e recomendações de suporte	44
Tabela 6 – Resumo dos custos de construção de túneis	46
Tabela 7 – Resumo de quantitativos obtido no <i>output</i> do modelo	63
Tabela 8 – Resumo dos reforços adotados para o túnel esquerdo	64
Tabela 9 – Resumo dos reforços adotados para o túnel direito	65
Tabela 10 – Suporte para maciços com Q entre 10 - 1000	76
Tabela 11 – Suporte para maciços com Q entre 1 - 10	77
Tabela 12 – Suporte para maciços com Q entre 0,1 - 1	78
Tabela 13 – Suporte para maciços com Q entre 0,001 - 0,1	79

Lista de abreviaturas e siglas

BIM	<i>Building Information Modeling</i>
HDD	<i>Horizontal directional drilling</i>
NATM	<i>New Austrian Tunneling Method</i>
RQD	Designação de Qualidade da Rocha
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
TBM	<i>Tunneling Boring Machine</i>
TCC	<i>Trabalho de Conclusão de Curso</i>
TIM	<i>Tunnel Information Modeling</i>

Lista de símbolos

J_n	Número de famílias de juntas
J_r	Índice de rugosidade
J_a	Índice de alteração
J_w	Fator de redução devido a presença de água
SRF	<i>Stress Reduction Factor</i>
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
r_1	Parâmetro de forma da seção do túnel
r_2	Parâmetro de forma da seção do túnel
r_3	Parâmetro de forma da seção do túnel
α	Ângulo de distribuição dos tirantes ao longo da seção do túnel - configuração 1
α'	Ângulo de distribuição dos tirantes ao longo da seção do túnel - configuração 2
d	Altura do perfil metálico W
b_f	Largura do perfil metálico W
t_f	Espessura da aba do perfil metálico W
t_w	Espessura da alma do perfil metálico W
γ	ângulo de inserção das enfilagens com relação ao alinhamento do túnel

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.3	DELIMITAÇÃO DO ESCOPO	20
1.4	LIMITAÇÕES	21
1.5	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	BUILDING INFORMATION MODELING	23
2.1.1	Definição	23
2.1.2	Dimensões do BIM	24
2.1.3	Benefícios	24
2.1.4	Desafios	25
2.1.5	Uso em obras de infraestrutura	26
2.1.6	TIM - <i>Tunneling Information Modeling</i>	27
2.2	OBRAS DE TÚNEIS	29
2.2.1	Etapas do projeto	29
2.2.1.1	Levantamento do terreno	30
2.2.1.2	Análises preliminares e detalhamento	31
2.2.1.3	Execução	31
2.2.1.4	Operação e manutenção	32
2.2.2	Estruturas de suporte	32
2.2.2.1	Tirantes	32
2.2.2.2	Cambotas	33
2.2.2.3	Concreto projetado	35
2.2.2.4	Enfilagem	35
2.2.3	Definição do suporte a ser utilizado	36
2.2.3.1	Classificação Q	37
2.2.3.2	RMR - <i>Rock Mass Rating</i>	41
2.2.3.3	Correlações entre as metodologias	44
3	METODOLOGIA	45
3.1	FLUXOGRAMA DE TRABALHO	45
3.2	MODELAGEM EM BIM	46

3.2.1	Definição dos parâmetros	47
3.2.2	Softwares utilizados	47
3.2.2.1	Autodesk Revit 2017	47
3.2.2.2	Dynamo 2.0	48
4	MODELAGEM	51
4.1	PARÂMETROS DO MODELO	51
4.1.1	Alinhamento	51
4.1.2	Seção transversal	51
4.1.3	Reforço por tirantes	52
4.1.4	Reforço por cambotas metálicas	53
4.2	Reforço por Enfilagens	54
4.3	RESULTADO	55
5	APLICAÇÃO	61
5.1	Adaptações Sugeridas para Conformação com o Modelo	61
5.2	Resultado	62
6	CONCLUSÃO	67
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
	REFERÊNCIAS	69
	ANEXOS	73
.1	RQD - <i>ROCK QUALITY DESIGNATION</i> (DEERE, 1964)	75
.2	CONFIGURAÇÕES DE REVESTIMENTO (BARTON; LIEN; LUNDE, 1974)	76
.3	PROJETO DE TÚNEL BR-280/CORUPÁ	81

1 INTRODUÇÃO

O êxodo rural e o aumento exponencial da população mundial no último século resultaram em um crescimento nunca antes visto na demanda por serviços de infraestrutura urbana através do globo. Segundo dados das Nações Unidas ([UNITED NATIONS, 2016](#)), em 2030 cerca de 60% da população mundial residirá em cidades. Para garantir que todos tenham acesso a serviços básicos de saneamento e transporte é imponderável que planejadores urbanos deixem de visualizar soluções apenas em duas dimensões e passem cada vez mais a considerar o mundo de possibilidades escondido sob seus pés. [BROERE \(2016\)](#), por exemplo, argumenta que soluções subterrâneas poderiam auxiliar a solucionar problemas como: congestionamentos, poluição, e conservação do patrimônio histórico; problemas estes que desafiam comunidades através de fronteiras nacionais.

Túneis são soluções de infraestrutura subterrânea de alta eficácia, contudo ainda exigem grandes quantias para serem executados, e, a despeito de avanços significativos alcançados na última década, ainda se mantêm complexos e desafiadores. Com o advento de sistemas de construção e ferramentas de análise mais arrojadas estes custos podem cair drasticamente, tornando assim a opção por túneis viável não só do ponto de vista tecnológico como também econômico.

1.1 JUSTIFICATIVA

Uma das ferramentas de análise com potencial para inovar o processo de projetar túneis é a chamada Modelagem da Informação da Construção (BIM - Building Information Modeling). O uso de ferramentas integradas de modelagem de projeto já vem se consolidando e aumentando sua base de adeptos entre os profissionais há algum tempo, porém seu escopo até o momento foi majoritariamente focado em obras de edificações. Ferramentas robustas especializadas neste tipo de obra já estão presentes no mercado e adquirem cada vez mais adeptos.

Por outro lado, até o presente momento observa-se um déficit de ferramentas e modelos para projetos de infraestrutura. Estes são projetos caracterizados pela sua extrema complexidade e normalmente exigem uma intensa colaboração entre as partes para chegar a uma configuração ótima final. Nessa intersecção reside uma grande oportunidade para empresas e profissionais se aventurarem como precursores, adquirindo expertise e aperfeiçoando metodologias de modo a produzir projetos mais sustentáveis e econômicos que a concorrência.

Ao estreitar a análise a obras de túneis feitas com auxílio de ferramentas integradas

de projeto é inevitável se deparar com uma ausência crítica de documentação. Poucos se aventuraram a fazer uso de tais ferramentas, a despeito de todas as vantagens que esta escolha culminaria. No entanto aqueles que o fizeram (os pioneiros, ou em inglês *early adopters*) colhem já os frutos do esforço dispendido.

Sabe-se que projetos de túneis demandam complexa documentação para execução, mas ao mesmo tempo estão altamente sujeitos a alterações devido à inerente imprevisibilidade das condições de campo. Criar modelos integrados de projeto poderia tornar todo o processo muito mais versátil, além de permitir que numa fase de estudos iniciais sejam testadas várias configurações de traçados e seções. Isto poderia permitir que projetistas otimizassem o projeto de maneira a encontrar soluções mais econômicas respeitando critérios de utilização e segurança.

Na prática corrente traçados de túneis são determinados com base exclusivamente no critério da menor distância percorrida. Isto pode conduzir a resultados não ótimos, uma vez que passar por trechos mais curtos, mas de pior qualidade e que demandem mais gasto com estruturas de suporte pode ser desvantajoso em relação a outras opções disponíveis.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolvimento de um modelo simplificado de projeto de túneis, utilizando-se das ferramentas desenvolvidas sob a égide da metodologia BIM (Seção 2.1).

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar os desafios para utilização de BIM em obras de túneis;
- Apontar possibilidades e vantagens advindas do uso de BIM nessas obras.
- Criar um modelo paramétrico de túnel que possa ser facilmente adaptável a vários projetos semelhantes;
- Gerar uma estimativa de quantitativos rápida para guiar o processo de tomada de decisões ao se definir o alinhamento do túnel;

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESCOPO

O trabalho optou por trabalhar com túneis rodoviários ou ferroviários de maior dimensão. Não foram impostas restrições quanto ao traçado ou comprimento do alinhamento adotado. Ao longo do trabalho o autor decidiu focar sua atenção à criação de um modelo de túnel com seção transversal lenticular formada por 4 arcos circulares definidos por três raios de giração. Quanto às estruturas de suporte empregadas, optou-se pelo uso

de tirantes e cambotas. Os tirantes são posicionados apenas no topo e paredes da seção transversal, e as cambotas também cobrem apenas a parte superior da seção e utilizam apenas perfis metálicos do tipo W.

1.4 LIMITAÇÕES

O trabalho desenvolvido possui limitações quanto à forma da seção transversal e quanto às opções e configurações disponíveis de estruturas de suporte. Apesar de permitir uma imensa gama de opções, nem todas as configurações exemplificadas por [MAIDL; THEWES; MAIDL \(2013\)](#) - Figura 8 - são possíveis de serem reproduzidas em sua atual versão. Além disso para as cambotas metálicas apenas perfis metálicos em seção W são disponibilizados.

Para além dessas limitações é acrescido o fato de não serem realizados cálculos de capacidade de suporte dentro da aplicação. O algoritmo não estima esforços solicitantes nem dimensiona a estrutura de suporte. Este dimensionamento ocorre fora da rotina e seu resultado alimenta o modelo na forma de um dado de entrada.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho inicia no Capítulo 2 com uma revisão da bibliografia sobre o uso de BIM em obras civis gerais e o estado da arte do desenvolvimento e adoção da tecnologia. Nisso segue-se uma breve explanação sobre o ambiente BIM em obras e projetos de infraestrutura, com ênfase em projetos de túneis.

O Capítulo 3 discorre sobre a metodologia utilizada, apresentando o fluxo de trabalho e detalhando especialmente as ferramentas selecionadas para o desenvolvimento da proposição.

Na sequência o Capítulo 4 descreve em detalhes o processo de modelagem do túnel em ambiente BIM. São apresentados todos os parâmetros de projeto adotados e como sua modificação.

O modelo é testado e validado no Capítulo 5. Dois exemplos são desenvolvidos para melhor descrever o funcionamento do sistema proposto.

Por fim, no Capítulo 6, elencam-se as conclusões tiradas da experiência e fazem-se recomendações de tópicos que possam ser abordados em futuros trabalhos.

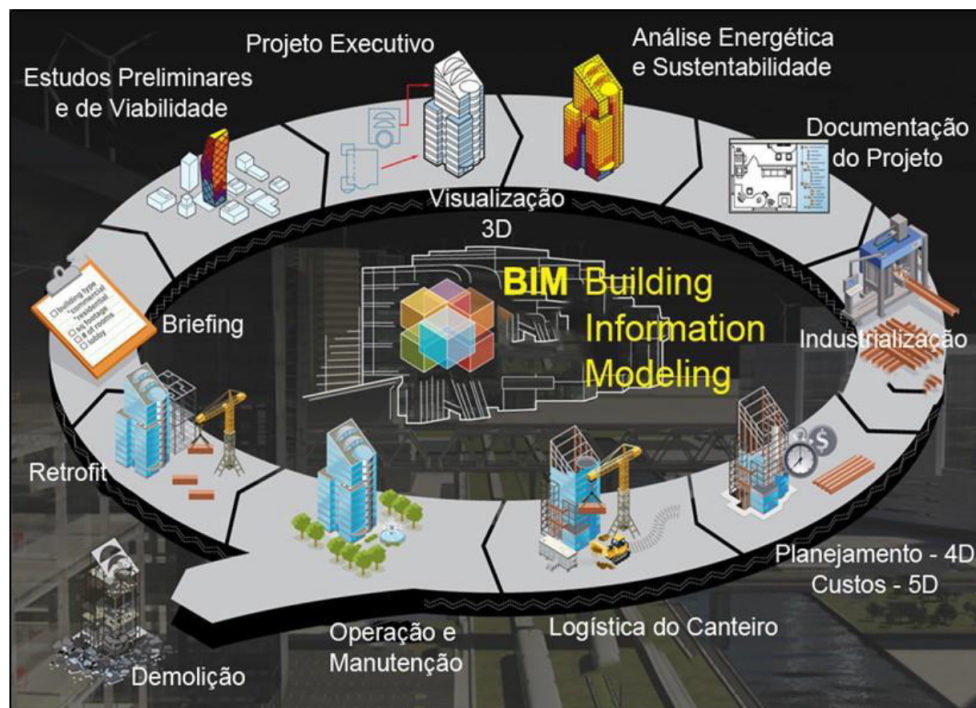
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BUILDING INFORMATION MODELING

2.1.1 Definição

Segundo [Júnior et al. \(2017\)](#) a tecnologia de Modelagem de Informações da Construção (*Building Information Modeling* em inglês e comumente abreviado para BIM) foi desenvolvida com o intuito de ser uma tecnologia de modelagem e gerenciamento das informações da construção não somente quanto aos dados e parâmetros relacionados à geometria de um edifício, mas também para registrar todas as informações pertinentes à construção, operação e manutenção do mesmo, permitindo o desenvolvimento integrado e colaborativo entre os agentes envolvidos no projeto (Figura 1).

Figura 1 – Ciclo de vida da edificação e o BIM



Fonte: [SANTA CATARINA \(2013\)](#).

Não se deve confundir BIM com aplicações específicas disponíveis no mercado atualmente que nada mais fazem que se basear e aplicar alguns de seus conceitos. [Nogueira \(2016\)](#) define BIM como "uma metodologia de projetar na construção civil que envolve uma série de processos, softwares e pessoas".

A aplicação de BIM trás muito mais responsabilidade para as fases de projeto, que

acabam tomando mais tempo para resolver conflitos e problemas que antes eram delegados à equipe de execução. [Walasek e Barszcz \(2017\)](#) relatam um estudo de caso ocorrido na Polônia: optou-se por utilizar BIM em um projeto de um edifício comercial. As fases de projeto foram ampliadas e demandaram mais tempo, por outro lado a execução foi mais rápida e o cliente relatou altos níveis de satisfação, alegando o fato de poder usar o modelo digital para programar as manutenções prediais.

2.1.2 Dimensões do BIM

Uma categorização já clássica na literatura define dimensões para o BIM à medida que novas camadas de informações são adicionadas ao modelo, aumentando sua riqueza de detalhes e complexidade. São estas dimensões conforme [Czmoch e Pękala \(2014\)](#):

- BIM 3D - Modelo virtual paramétrico em 3D;
- BIM 4D - Planejamento. Denota o modelo em 3D acrescido da variável tempo, onde cada elemento é alocado em uma sequência de produção. Permite dividir o projeto em fases, planejar cronogramas e estimar prazos;
- BIM 5D - Quantitativos. Modelo anterior acrescido da possibilidade de se extrair informações sobre a quantidade de material que deve ser utilizada. Permite criar estimativas precisas de custo nas obras;
- BIM 6D - Sustentabilidade. Permite se integrar dados de meio ambiente no modelo, por exemplo estimar o consumo de água e energia do empreendimento; e
- BIM 7D – Gerenciamento do ciclo de vida. Criando-se uma base de dados extremamente detalhada é possível obter informações relativas à vida útil dos vários sistemas que compõem a edificação, alertar para manutenções programadas e gerir períodos de garantia.

2.1.3 Benefícios

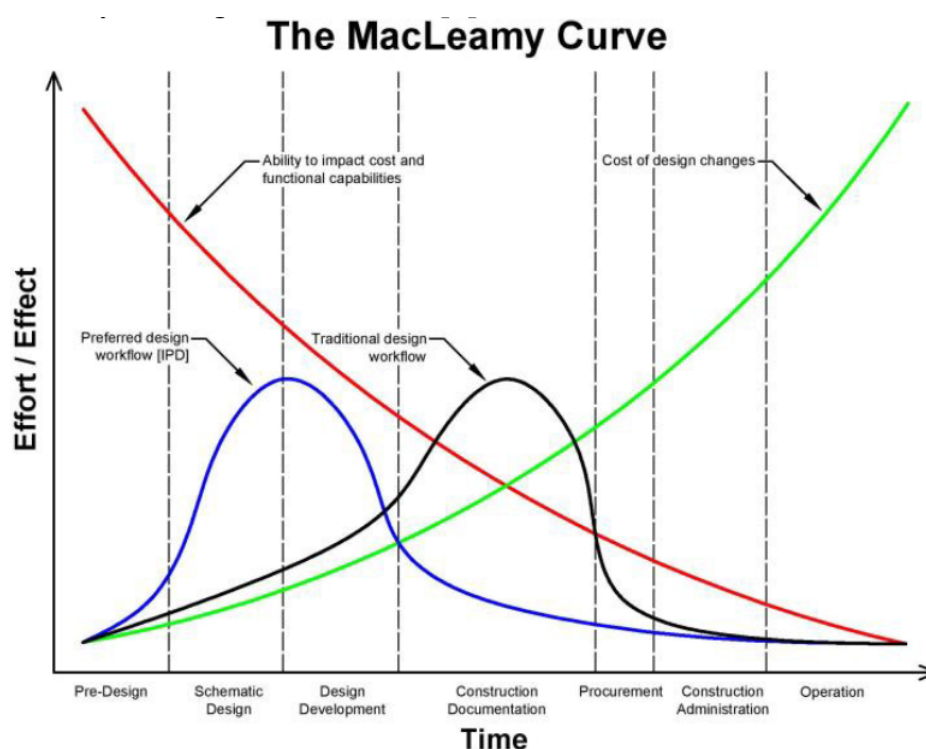
[Eastman et al. \(2011\)](#) elencaram em seu trabalho diversos benefícios do uso de BIM em projetos, podendo-se citar:

- Correções automáticas de baixo nível quando mudanças são feitas no projeto;
- Geração de desenhos 2D precisos e consistentes em qualquer etapa do projeto;
- Colaboração antecipada entre múltiplas disciplinas de projeto;
- Extração de estimativas de custo durante a etapa de projeto;
- Sincronização de projeto e planejamento da construção;
- Descoberta de erros de projeto e omissões antes da construção;
- Reação rápida a problemas de projeto ou no canteiro de obra;
- Uso do modelo de projeto como base para componentes fabricados;
- Sincronização da aquisição de materiais com o projeto e a construção;

- Melhor gerenciamento e operação das edificações.

O uso de BIM em projetos desloca o pico de esforço despendido, que por meio de processos tradicionais se dá na documentação, para as fases de concepção e modelagem. Uma eventual alteração nas fases de concepção impacta menos o custo do projeto que alterações na fase de detalhamento. Esta argumentação foi desenvolvida por Patrick McLeamy e é ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – A curva de MacLeamy



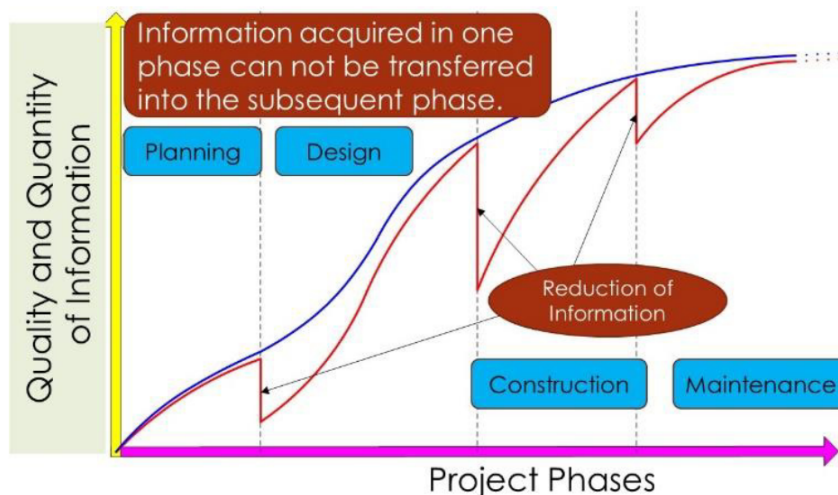
Fonte: Walasek e Barszcz (2017).

Minagawa e Kusayanagi (2015) ainda argumentam que por meio de processos tradicionais a cada fase avançada em um projeto informações são perdidas. Considerações do modelo, detalhes e problemas encontrados durante a construção não seguem adiante para as próximas fases. Com o uso de BIM tende-se a fechar estas lacunas uma vez que o modelo comprime todas as informações do projeto. Este fenômeno é exemplificado na Figura 3.

2.1.4 Desafios

A implantação de BIM em um ambiente com um *modus operandi* já consolidado na construção civil é uma experiência desafiadora. Encontra-se por parte de praticantes muita resistência em alterar seus métodos de projetar e executar obras de qualquer escala e magnitude. Nogueira (2016) argumenta que a transição para o BIM envolve uma nova

Figura 3 – Lacunas de informação a cada fase de projeto



Fonte: [Minagawa e Kusayanagi \(2015\)](#).

dinâmica na forma de visão do processo de desenvolvimento do projeto, trazendo consigo uma série de novas regras.

Uma preocupação latente entre os praticantes é o custo envolvido na transição. Nota-se um temor latente de que ferramentas baseadas em BIM inflam os custos da empresa, além dos custos em capacitação dos profissionais e a perda inicial de eficiência dos processos.

[Minagawa e Kusayanagi \(2015\)](#), por exemplo, relatam as dificuldades encontradas em se propor o uso de BIM em obras públicas no Japão. Em geral as maiores reclamações dos praticantes ficaram a cargo de problemas com incompatibilidades e receios quanto à proteção jurídica do direito e à produção intelectual neste novo contexto.

2.1.5 Uso em obras de infraestrutura

Obras de infraestrutura possuem características peculiares que lhes diferenciam das obras civis comuns. Seus projetos são de natureza extremamente complexa e diversa, requerendo alto grau de coordenação entre todas as partes envolvidas ([CHONG et al., 2016](#)). O mesmo autor citado destaca que no contexto de obras de infraestrutura o uso de ferramentas baseadas em BIM serviria para criar, gerir e manter todas as informações contidas em uma obra (informações geoespaciais, recursos necessários, representações gráficas do projeto, etc); ajudando na obtenção de resultados mais eficientes e econômicos.

Vários trabalhos foram publicados nos últimos tempos lidando com os desafios de implementar BIM para projetos de infraestrutura, propondo formas inovadoras de gerir grandes volumes de dados heterogêneos, integrando e compartilhando-os em uma mesma plataforma ([OSELLO; RAPETTI; SEMERARO, 2017](#)). Alguns exemplos encontrados na

literatura são apresentados a seguir.

Fanning et al. (2015) comparou a construção de duas pontes pela mesma empreiteira no estado do Colorado-EUA: uma baseada em BIM e outra utilizando métodos tradicionais de projeto. Por se tratarem de duas obras diferentes o autor fez uso de métodos de normalização para conduzir comparações entre as duas e buscou validar as conclusões através de entrevistas com os responsáveis por cada obra. O estudo determinou que a ponte onde se utilizou tecnologia baseada em BIM teve um custo 70% superior por metro quadrado construído, porém argumenta que este valor pode representar a maior complexidade do projeto em questão e refletir o efeito da falta de experiência da equipe responsável com o uso da tecnologia. Houve ainda uma significativa diminuição nos conflitos entre projetos e em problemas de falta de informação ou ambiguidades. A obra que utilizou BIM, apesar de sua maior complexidade, não registrou nenhum retrabalho durante a sua execução, enquanto a outra ponte projetada com ferramentas tradicionais registrou dois casos de retrabalho durante sua execução.

Chong et al. (2016) fizeram uso de BIM para dois trechos experimentais de obras rodoviárias, uma na China e outra na Austrália. Os dois projetos obtiveram alto grau de sucesso e foi possível prever ainda na fase de projeto problemas que seriam enfrentados pela equipe de execução. Ainda na obra chinesa houve uso extensivo de tecnologias complementares como acompanhamento remoto da obra por laser-scanners e uso do modelo digital criado para impressão de uma maquete 3D. É também interessante ressaltar que o alto nível de detalhamento dos projetos resultou em arquivos muito pesados, o que por sua vez prejudicava a integração entre as partes envolvidas. Kim, Chen e Cho (2015) também trabalharam com BIM para obras rodoviárias, mas no caso focaram sua análise na mensuração de movimentações de terra. Os autores integraram plataformas BIM e GIS para conseguir quantitativos mais precisos.

Para finalizar vale ressaltar o que Daller et al. (2016) afirmam em seu estudo do mercado de BIM para projetos de túneis: "BIM mal utilizado é mais desastroso que projetos tradicionais bem especificados". O uso não-racionalizado dessa nova ferramenta pode resultar em mais problemas do que soluções, logo sua introdução deve ser procedida de maneira racional.

2.1.6 TIM - *Tunneling Information Modeling*

O uso de tecnologia BIM de túneis ainda vem sendo pouco observado na prática (também é chamado de Modelagem de Informações de Túneis, ou *Tunneling Information Modeling* em inglês - abreviado para TIM). Osello, Rapetti e Semeraro (2017) relatam o processo de modelagem de um túnel construído no norte da Itália em *softwares* BIM. Os autores afirmam ter alcançado nível de detalhamento 4, o que demandou extenso trabalho de modelagem. Foram relatados problemas de compatibilização durante a exportação dos

modelos para *softwares* especializados na análise de esforços do maciço e o arquivo teve de ser readequado, gerando retrabalho e perda de informações no processo. No entanto os autores afirmam que o uso dessas ferramentas agregou valor ao projeto, evitando erros, gerando quantitativos mais precisos e ajudando as equipes de trabalho no entendimento e visualização do projeto. Metodologia semelhante foi aplicada por [Schiavinato et al. \(2016\)](#) em um túnel no sul da Itália e obteve resultados que corroboram a análise do grupo anterior.

[Koch, Vonthron e König \(2017\)](#) também relata o uso de BIM em um trecho do projeto do metrô de Düsseldorf, cidade situada no oeste da Alemanha. Os autores criaram um modelo compreensivo contendo informações de todo o ambiente construído, propriedades do solo e geologia local, além do alinhamento do túnel e suas propriedades geométricas. O modelo foi utilizado como balizador para o projeto executivo do túnel, servindo de base para estimar recalques na superfície e também estimar o desempenho esperado da máquina tuneladora ao longo do alinhamento proposto.

[Daller et al. \(2016\)](#) analisaram a situação atual do mercado e concluíram que a maior parte das empresas pioneiras em projetos de túneis com BIM criam seus próprios modelos, gerando uma falta de normatização do processo. Os autores então utilizaram programas de modelagem em BIM disponíveis no mercado e propuseram um *framework* para criação de famílias que segundo os mesmos contemplaria os itens considerados fundamentais para projetos desse tipo:

- Modelagem da geologia local;
- Modelagem das escavações e suportes;
- Modelagem das estruturas permanentes;

O objetivo segundo os autores não é criar uma maquete tridimensional do túnel, mas sim uma ferramenta integrada e compreensiva de gerenciamento de todas as informações sobre a obra. [Júnior et al. \(2017\)](#) complementa este raciocínio citando características macro de *softwares* em BIM e sua relevância para "estruturas lineares"(infraestrutura) e "estruturas verticais"(obras civis). Um resumo é apresentado na Figura 4. Numa análise da aplicação de BIM em empreendimentos de infraestrutura subterrânea os autores mostraram que as soluções de modelagem ainda demandam várias adaptações e integrações entre diferentes programas computacionais e rotinas de trabalho, além de demandar uma nova mentalidade na organização e estruturação do desenvolvimento dos trabalhos de engenharia de projeto.

Figura 4 – Características macro por tipo de estrutura

Característica Macro	Tipo	
	Estruturas Lineares	Estruturas Verticais
	Elementos distribuídos sobre grandes extensões de terreno	Elementos concentrados numa área delimitada
Usos em destaque		
Integração com GIS	Muito Relevante	Pouco Relevante
Análise de Interferências com Condições Locais	Muito Relevante	Relevante
Análise de Interferência com Outros Elementos Modelados	Pouco Relevante	Muito Relevante
Coordenação de Projeto	Muito Relevante	Muito Relevante
Levantamento de Quantitativos	Muito Relevante	Muito Relevante
Modelagem 4D	Relevante	Relevante

Fonte: Júnior et al. (2017).

2.2 OBRAS DE TÚNEIS

O dicionário Oxford define um túnel como uma passagem subterrânea artificial, especialmente as construídas sob montanhas, rios, prédios ou estradas.¹ São obras lineares de grande complexidade e que envolvem a coordenação de diversas disciplinas para seu sucesso. Atualmente diversas soluções se apresentam para conduzir a construção de túneis nos mais variados tipos de terreno, mas cada solução deve ser avaliada pois nenhum projeto de túnel é igual a outro, cada qual possui sua singularidade.

Esta seção se destina a examinar os aspectos de um projeto de túnel e fazer uma revisão de técnicas consagradas na execução de tais projetos.

2.2.1 Etapas do projeto

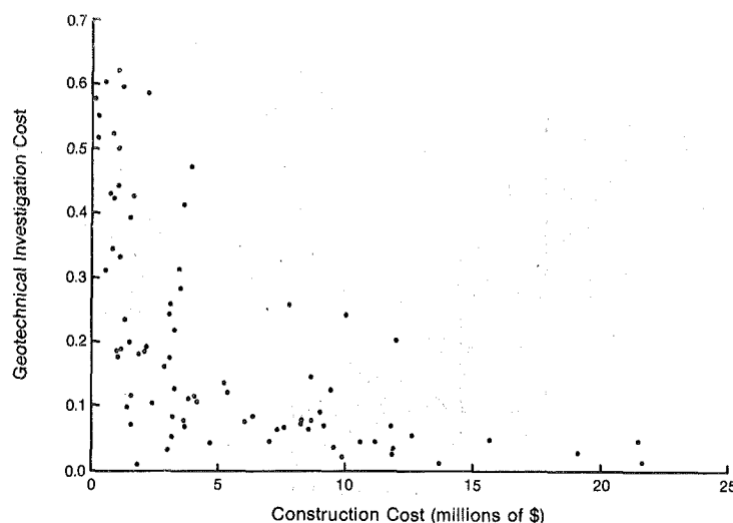
Cada projeto de túnel apresenta desafios e soluções únicas, sendo portanto difícil a proposição de uma metodologia única e universal para sua conceptualização. Propõe-se então elencar a seguir algumas etapas genéricas que usualmente são seguidas no decorrer do desenvolvimento do empreendimento, cabendo ao engenheiro responsável a decisão de se aprofundar em alguma delas quando julgar necessário.

¹ <<https://en.oxforddictionaries.com/definition/tunnel>>, acessado em outubro de 2018

2.2.1.1 Levantamento do terreno

As condições do terreno vão conduzir o processo de tomada de decisões de todo o projeto executivo; logo, esta etapa deve ser conduzida com extremo zelo para não comprometer o prosseguimento do empreendimento. Em geral são gastos de 1 a 3% do orçamento do projeto com o levantamento de dados. A alocação desses recursos é normalmente atrelada à experiência do engenheiro encarregado, tendo esta experiência prévia em outras obras desse tipo. Há muita responsabilidade nas decisões aqui tomadas. [Temple e Stukhart \(1987\)](#) mostraram que consegue-se reduzir drasticamente o custo total de obras ao se investir em estudos preliminares (Figura 5), ainda que os autores não tenham obtido uma correlação matemática satisfatória entre as duas variáveis, não se pode desprezar a importância de se obter os dados necessários para condução segura do projeto.

Figura 5 – Custo de construção x Percentual gasto com levantamentos geotécnicos



Fonte: [Temple e Stukhart \(1987\)](#).

Os objetivos a serem alcançados nesta etapa do projeto segundo [Chapman, Metje e Stärk \(2010\)](#) incluem:

- Locação de tubulações e outros serviços já instalados;
- Avaliação de estruturas que podem ser impactadas, especialmente as de relevância histórica;
- Identificação de locais de difícil acesso;
- Identificação prévia da geologia local;
- Identificação de outras construções na área impactada (incluindo construções previstas);
- Elencamento de possíveis riscos.

2.2.1.2 Análises preliminares e detalhamento

Nesta etapa iniciam-se as análises de capacidade de suporte do túnel e estudam-se medidas que podem ser adotadas para melhorá-la. De vital importância é o cálculo de tensões atuantes no substrato antes, durante e após a construção do túnel, além da capacidade auto-portante do maciço. Usualmente busca-se uma solução que otimize o uso da capacidade do maciço de redistribuir esforços e atingir uma nova configuração de equilíbrio sem que seja necessária grande intervenção para reforçar o túnel. Segundo [Chapman, Metje e Stärk \(2010\)](#) a estabilidade de um túnel depende em geral:

- Da geometria e profundidade do túnel;
- Do perfil geológico;
- Da permeabilidade do solo e pressão hidrostática;
- Da espessura e resistência das camadas de solo;
- Da estrutura de suporte utilizada durante a construção.

Há vários modelos já idealizados para cálculo de tensões em um túnel, indo-se desde modelos analíticos mais simples a modelos numéricos mais complexos fundamentados normalmente em elementos finitos ([POTTS; ZDRAVKOVIĆ, 1999a](#); [POTTS; ZDRAVKOVIĆ, 1999b](#)). Idealmente a complexidade do modelo de cálculo deve ser aumentada à medida que se avançam as fases de detalhamento do projeto, com modelos mais simples para as fases de anteprojeto e projeto básico e mais complexos para fase de projeto executivo.

É também nesta etapa que são definidas as técnicas de escavação a serem utilizadas durante a execução. Esta decisão impactará fortemente o orçamento e planejamento de toda a obra. Verifica-se na prática corrente uma vasta gama de opções disponíveis, cada qual com seus prós e contras. Fica em geral a cargo do engenheiro, respaldado pela sua experiência em obras semelhantes, a tarefa de decidir a melhor opção disponível. Entre as técnicas mais comuns disponíveis pode-se citar: máquinas tuneladores; explosivos; *cut and cover*; NATM; *pipejacking*; HDD - *horizontal directional drilling*.

2.2.1.3 Execução

Durante a execução de túneis o engenheiro responsável depara-se inevitavelmente com condições de terreno não previstas durante as fases anteriores. Isso se deve principalmente à grande complexidade em obter informações que representem com exatidão o terreno. Na prática comum são obtidos dados através de perfurações pontuais na área impactada, gerando assim uma nuvem de dados pontuais (unidimensionais) num universo bidimensional. É realizada então uma triangulação entre os pontos onde se conhecem as propriedades para se obter uma estimativa do perfil do terreno por completo. Estes dados contêm intrinsecamente inexatidões, como já apontado por [Deere \(1964\)](#).

Todo este processo faz com que seja necessário um constante controle durante a

execução de um túnel, tanto para mantê-lo dentro do alinhamento proposto como para controlar suas deformações (e consequentemente resistir aos esforços atuantes). Observando-se condições geológicas ou valores de deformações diferentes daqueles preconizados deve-se proceder com medidas paliativas para reforçar a seção e manter a estabilidade da estrutura.

2.2.1.4 Operação e manutenção

Idealmente deve-se manter constante verificação do estado da estrutura para que atenda os critérios estabelecidos de operabilidade. Essas verificações se dão tanto em termos de conservação dos elementos de suporte como verificação de eventuais alterações no estado de tensões do maciço. Atualmente com o desenvolvimento e barateamento de sensores de deslocamento e extensômetros, os mesmos podem ser aplicados em pontos específicos ao longo do alinhamento e gerar periodicamente dados sobre a condição do túnel. Verificadas condições inseguras pode-se alertar o operador do túnel para realizar as correções necessárias.

2.2.2 Estruturas de suporte

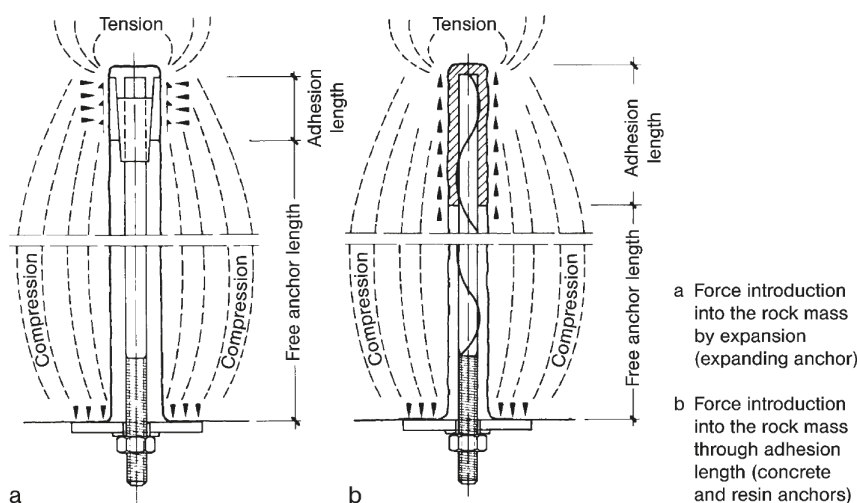
Num projeto de túnel busca-se minimizar o uso de estruturas de suporte, idealmente encontrando uma configuração onde ocorra uma redistribuição de tensões no mesmo e consiga-se um rearranjo na nova composição sem suporte algum (capacidade auto-portante). No entanto, na maioria dos casos isso não ocorre e provisões são necessárias para assegurar a estabilidade do túnel tanto durante a construção quanto durante sua utilização.

As tensões que atuam nas estruturas de suporte do túnel não são as primárias, referente a condição inalterada do maciço. Com o decorrer da escavação a seção da abertura se deforma e as tensões são redistribuídas, reduzindo as tensões primárias. Deve-se observar que o problema de dimensionar a estrutura de suporte passa a se tornar um problema de interação solo-estrutura, uma vez que o carregamento aplicado no suporte depende da deformação do mesmo (BICKEL; KUESEL; KING, 1996; KOLYMBAS, 2008; FRANÇA, 2006).

2.2.2.1 Tirantes

São elementos semelhantes a parafusos longos ancorados ao maciço para lhe garantir estabilidade. Podem ser ancorados por expansão do ancorador, Figura 6 (a), ou pela injeção de calda de cimento, Figura 6 (b). São usados normalmente como reforço temporário fim de garantir a segurança dos trabalhos até que se instalem as estruturas finais de suporte. Também podem ser usados como suporte definitivo, porém evita-se este uso uma vez que é difícil determinar seu comportamento mecânico no longo prazo (MAIDL; THEWES; MAIDL, 2013).

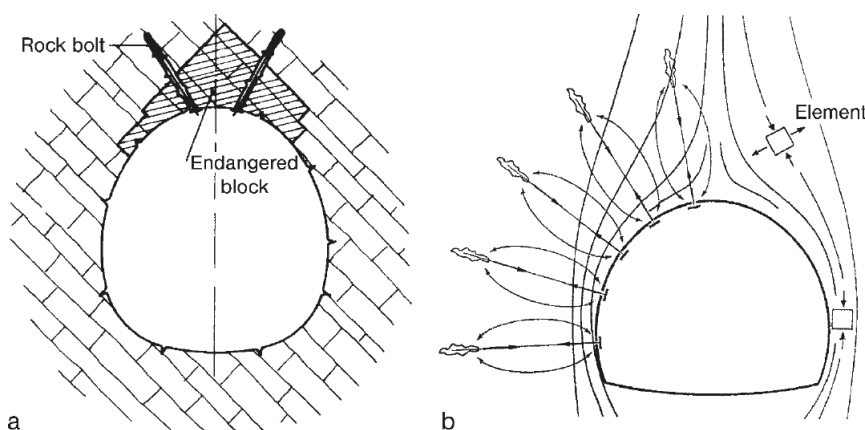
Figura 6 – Sistemas de aconragem de tirantes



Fonte: Maidl, Thewes e Maidl (2013).

Os tirantes podem ter atuação localizada para ancorar um bloco solto de rocha ou atuar em grupos para formar um *anel estrutural* resistente (MAIDL; THEWES; MAIDL, 2013). Ambos os comportamentos são ilustrados na Figura 7.

Figura 7 – Sistemas de atuação dos tirantes: individual (esquerda) e em grupo (direita)



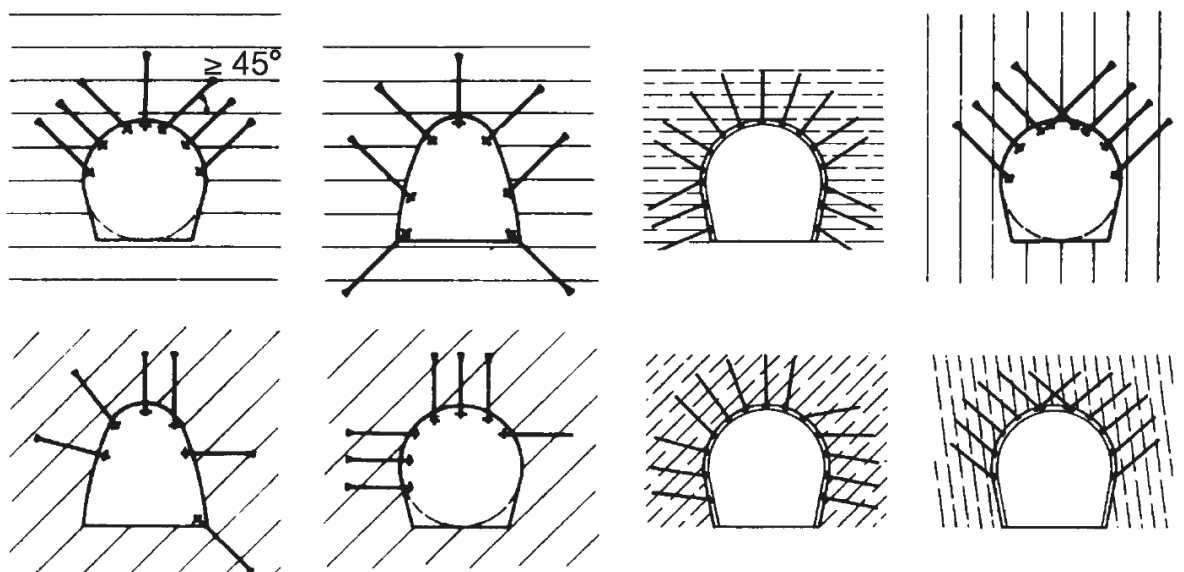
Fonte: Maidl, Thewes e Maidl (2013).

Há várias configurações que podem ser utilizadas para se posicionar tirantes ao longo da seção transversal do túnel. Deve-se evitar posicioná-los a ângulos iguais ou menores que 30° em relação aos planos de descontinuidade do maciço (MAIDL; THEWES; MAIDL, 2013). A Figura 8 ilustra algumas opções de configurações que podem ser adotadas.

2.2.2.2 Cambotas

São arcos compostos de treliças ou perfis metálicos instalados ao longo do alinhamento para garantir suporte do teto do túnel. São normalmente instalados e recobertos por

Figura 8 – Configurações de posicionamento de tirantes



Fonte: Maidl, Thewes e Maidl (2013).

concreto projetado para garantir maior integração no sistema maciço-suporte. A Figura 9 mostra um túnel reforçado com cambotas metálicas.

Figura 9 – Túnel reforçado com cambotas



Fonte: <<http://projects.dr-sauer.com/taxonomy/term/23?page=1>>, acessado em outubro de 2018.

Deve-se atentar para a instalação das cambotas de modo a garantir que a distribuição de ações seja o mais uniforme possível (Figura 10). O acúmulo de carregamento em um ponto pode reduzir drasticamente a capacidade de suporte do sistema.

Figura 10 – Efeito da distribuição de esforços nas cambotas metálicas



Fonte: [Kolymbas \(2008\)](#).

Suportes em madeira foram muito utilizados no passado para exercer a mesma função, porém atualmente caíram em desuso.

2.2.2.3 Concreto projetado

Concreto projetado é um concreto transportado sob alta pressão através de uma mangueira pneumática e projetado em direção às faces do túnel em alta velocidade enquanto é compactado ([DIN, 2005](#)). Na construção de túneis o concreto projetado ganhou espaço por se mostrar altamente versátil e é normalmente empregado para selar superfícies recentemente descobertas e para suportar a escavação ([KOLYMBAS, 2008](#)).

O mesmo autor infere que as únicas diferenças entre o concreto projetado e o concreto convencional são sua forma de aplicação e o módulo de elasticidade um pouco reduzido para o primeiro; não havendo diferenças entre as resistências características.

O concreto projetado pode ser obtido de duas maneiras:

1. Via seca: a mistura de cimento e agregados é bombeada com uso de ar comprimido e ao ser lançada pelo bocal mistura-se com a água, também bombeada, em pleno ar;
2. Via úmida: a mistura de concreto é simplesmente bombeada com uso de ar comprimido e projetada contra a superfície.

A Figura 11 ilustra ambas as possibilidades.

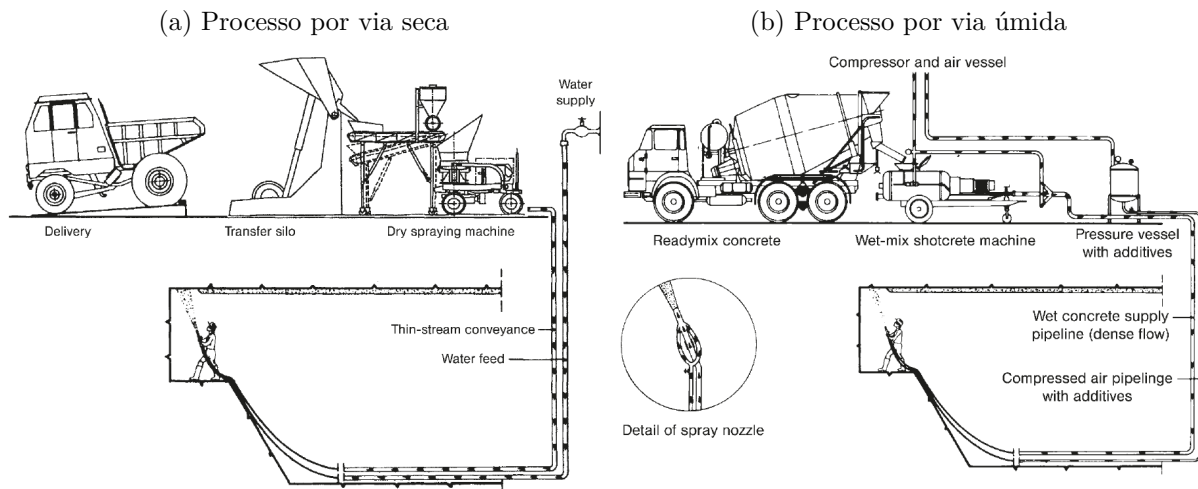
2.2.2.4 Enfilagem

Para túneis escavados em solo ou rocha com alto grau de intemperismo pode-se optar por estabilizar o material aplicando graute sob pressão. O graute cimenta o material e lhe garante maior estabilidade, reduzindo a propensão a desabamentos.

Normalmente tal solução é adotada para garantir segurança a frente de escavação ([12](#)). O graute é injetado na direção da escavação a um ângulo quase paralelo ao alinhamento do túnel, de forma a criar uma cortina de sustentação.

O graute é aplicado com auxílio de válvulas manchete. Ao romper-se a manchete o graute é liberado e infiltra no material conforme mostra a Figura 13. Sua pressão de

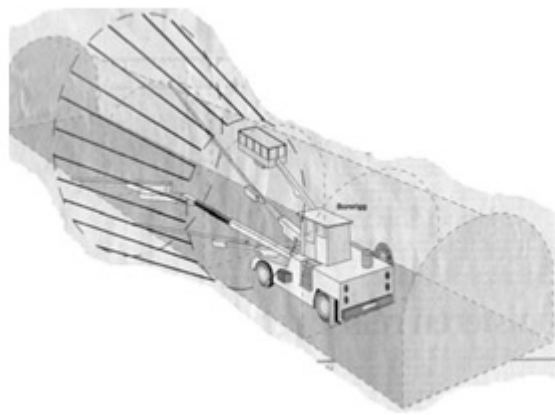
Figura 11 – Processos de aplicação de concreto projetado



Fonte: [Maidl, Thewes e Maidl \(2013\)](#).

aplicação deve ser controlada.

Figura 12 – Representação da execução de enfilagens em uma obra de túnel



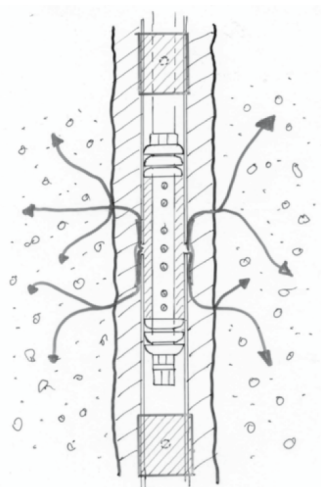
Fonte: [Tecnogeo \(2018\)](#).

Uma alternativa ao uso de graute é promover o congelamento do material. Apesar dos bons resultados que apresenta, esta técnica não é muito utilizada devido aos altos custos associados.

2.2.3 Definição do suporte a ser utilizado

O problema de se definir o melhor tipo de estrutura de suporte a se utilizar foi tema de vários trabalhos ao longo do último século e continua motivando pesquisadores na atualidade ([LÜ; JIAN; ZHENG, 2017](#); [GAO et al., 2016](#); [TOMA; JODL, 2006](#)). Vários

Figura 13 – Sistema de injeção de grout por válvulas manchete



Fonte: [Kolymbas \(2008\)](#).

autores propuseram metodologias para se determinar o tipo e quantidade de suporte necessários a uma escavação. Dois dos métodos mais utilizados são descritos a seguir.

2.2.3.1 Classificação Q

[Barton, Lien e Lunde \(1974\)](#) propuseram uma metodologia para estimar a quantidade de reforços que devem ser utilizados em uma obra de túnel a partir de correlações feitas ao estudar dados de cerca de 200 obras já executadas. Foi proposto o cálculo de um coeficiente Q que quantificaria a qualidade do maciço a ser atravessado. Este valor varia entre 0,001 (excepcionalmente ruim) a 1000 (excepcionalmente bom) e depende de 6 parâmetros:

- RQD (Anexo .1);
- número de conjuntos de juntas;
- rugosidade das juntas mais fracas;
- o grau de degradação ou material depositado nas juntas mais fracas;
- e outros dois parâmetros que descrevem o carregamento e a presença de água subterrânea (estão relacionados ao estado de tensões do maciço).

Estes parâmetros são combinados conforme a Equação 2.1 para estimar o coeficiente Q.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (2.1)$$

onde:

RQD = *Rock Quality Designation*

J_n = Número de famílias de juntas

J_r = Índice de rugosidade

J_a = Índice de alteração

J_w = Fator de redução devido a presença de água

SRF = *Stress Reduction Factor*

O primeiro quociente da equação 2.1 representa a estrutura do maciço. Já o segundo quociente representa a rugosidade e o grau de degradação das juntas. Por último o terceiro quociente é composto por dois parâmetros relacionados ao estado de tensões do maciço. Vale notar que a técnica não leva em consideração o ângulo de inclinação das juntas. Logo, problemas relacionados a estabilidade dos blocos rochosos deverão ser avaliados por meio de outras técnicas.

A Tabela 1 traz os valores a serem adotados para cada parâmetro dadas as condições do ambiente analisado.

Tabela 1 – Descrição e valores para os parâmetros de entrada do método Q

RQD (Rock Quality Designation)

Very poor	RQD = 0 - 25%
Poor	25 - 50
Fair	50 - 75
Good	75 - 90
Excellent	90 - 100

Notes:

- (i) Where RQD is reported or measured as < 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q
- (ii) RQD intervals of 5, i.e. 100, 95, 90, etc. are sufficiently accurate

Jn (joint set number)

Massive, no or few joints	Jn = 0.5 - 1
One joint set	2
One joint set plus random joints	3
Two joint sets	4
Two joint sets plus random joints	6
Three joint sets	9
Three joint sets plus random joints	12
Four or more joint sets, heavily jointed, "sugar-cube", etc.	15
Crushed rock, earthlike	20

Notes: (i) For tunnel intersections, use (3.0 x Jn); (ii) For portals, use (2.0 x Jn)

Jr (joint roughness number)

a) Rock-wall contact,		c) No rock-wall contact when sheared	
b) rock-wall contact before 10 cm shear			
Discontinuous joints	Jr = 4	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact	Jr = 1.0
Rough or irregular, undulating	3	Sandy, gravelly or crushed zone thick enough to prevent rock-wall contact	1.0
Smooth, undulating	2		
Slickensided, undulating	1.5		
Rough or irregular, planar	1.5		
Smooth, planar	1.0		
Slickensided, planar	0.5		

Note: i) Descriptions refer to small scale features, and intermediate scale features, in that order

Notes:

- i) Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m
- ii) Jr = 0.5 can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided the lineations are oriented for minimum strength

Ja (joint alteration number)

Contact between joint walls	JOINT WALL CHARACTER		Condition	Wall contact
	CLEAN JOINTS			
		Healed or welded joints:	filling of quartz, epidote, etc.	Ja = 0.75
		Fresh joint walls:	no coating or filling, except from staining (rust)	1
		Slightly altered joint walls:	non-softening mineral coatings, clay-free particles, etc.	2
	COATING OR THIN FILLING			
		Friction materials:	sand, silt, calcite, etc. (non-softening)	3
		Cohesive materials:	clay, chlorite, talc, etc. (softening)	4

Some or no wall contact	FILLING OF:	Type	Some wall contact Thin filling (< 5 mm)	No wall contact Thick filling
			Ja = 4	Ja = 8
	Friction materials	sand, silt calcite, etc. (non-softening)	6	5 - 10
	Hard cohesive materials	compacted filling of clay, chlorite, talc, etc.	8	12
	Soft cohesive materials	medium to low overconsolidated clay, chlorite, talc,	8 - 12	13 - 20
	Swelling clay materials	filling material exhibits swelling properties		

Jw (joint water reduction factor)

Dry excavations or minor inflow, i.e. < 5 l/min locally	$p_w < 1 \text{ kg/cm}^2$	Jw = 1
Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	1 - 2.5	0.66
Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	2.5 - 10	0.5
Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings	2.5 - 10	0.3
Exceptionally high inflow or water pressure at blasting, decaying with time	> 10	0.2 - 0.1
Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay	> 10	0.1 - 0.05

Note: (i) The last four factors are crude estimates. Increase Jw if drainage measures are installed

(ii) Special problems caused by ice formation are not considered

SRF (Stress Reduction Factor)

Weakness zones intersecting excavation	Multiple weakness zones with clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)	SRF = 10
	Single weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation < 50 m)	5
	Single weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation > 50 m)	2.5
	Multiple shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (any depth)	7.5
	Single shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (depth of excavation < 50 m)	5
	Single shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (depth of excavation > 50 m)	2.5
Competent rock, rock stress problems	Loose, open joints, heavily jointed or "sugar-cube", etc. (any depth)	5

Note: (i) Reduce these SRF values by 25 - 50% if the relevant shear zones only influence, but do not intersect the excavation.

	σ_c / σ_1	σ_0 / σ_c	SRF
Low stress, near surface, open joints	> 200	< 0.01	2.5
Medium stress, favourable stress condition	200 - 10	0.01 - 0.3	1
High stress, very tight structure. Usually favourable to stability, may be except for walls	10 - 5	0.3 - 0.4	0.5 - 2
Moderate slabbing after > 1 hour in massive rock	5 - 3	0.5 - 0.65	5 - 50
Slabbing and rock burst after a few minutes in massive rock	3 - 2	0.65 - 1	50 - 200
Heavy rock burst (strain burst) and immediate dynamic deformation in massive rock	< 2	> 1	200 - 400

Notes: (ii) For strongly anisotropic stress field (if measured): when $5 < \sigma_1 / \sigma_3 < 10$, reduce σ_c to $0.75 \sigma_c$. When $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduce σ_c to $0.5 \sigma_c$

(iii) Few case records available where depth of crown below surface is less than span width. Suggest SRF increase from 2.5 to 5 for low stress cases

		σ_0 / σ_c	SRF
Squeezing rock	Plastic flow of incompetent rock under the influence of high pressure		
	Mild squeezing rock pressure	1 - 5	5 - 10
	Heavy squeezing rock pressure	> 5	10 - 20
Swelling rock	Chemical swelling activity depending on presence of water		
	Mild swelling rock pressure		5 - 10
	Heavy swelling rock pressure		10 - 15

Fonte: <http://www.rockmass.net/files/short_on_Q-system.pdf>, acessado em setembro de 2018. Adaptado de Barton, Lien e Lunde (1974).

De acordo com o valor de Q obtido para um maciço, Barton propôs um sistema de classificação composto de 9 categorias, como mostra a Tabela 2:

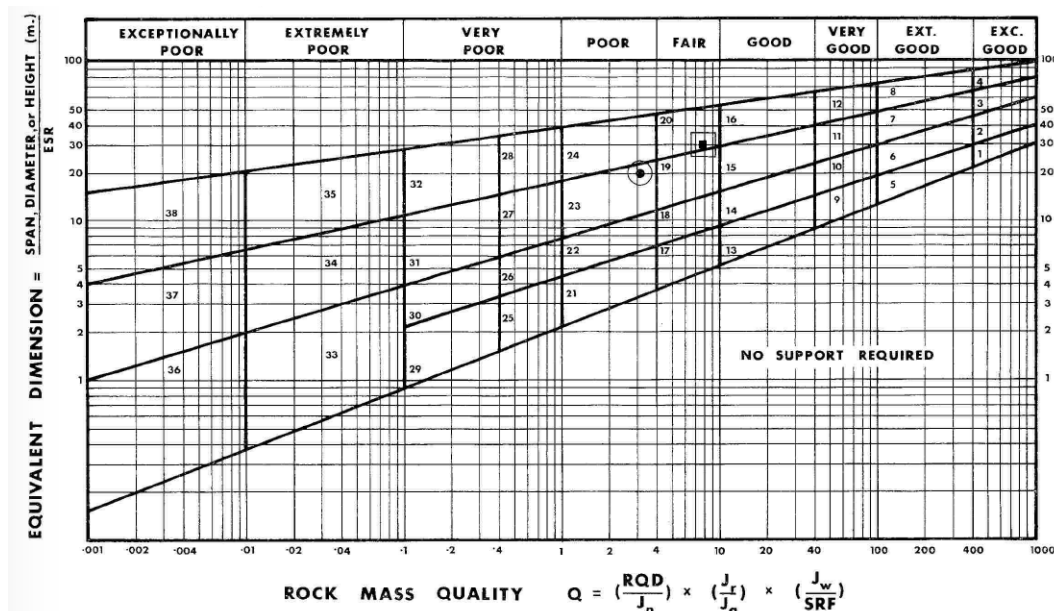
Tabela 2 – Categorias de maciço propostas por Barton, Lien e Lunde (1974)

Categoria	Limites de Q
Excepcionalmente Pobre	0,001 - 0,01
Extremamente Pobre	0,01 - 0,1
Muito Pobre	0,1 - 1
Pobre	1 - 4
Médio	4 - 10
Bom	10 - 40
Muito Bom	40 - 100
Extremamente Bom	100 - 400
Excepcionalmente Bom	400 - 1000

Fonte: Autor (2018).

Obtida a classificação Q de um maciço e as dimensões do túnel que nele se deseja escavar, Barton também propôs um diagrama (Figura 14) onde recomenda a configuração de suporte que deve ser utilizada. São 38 configurações diferentes, cada uma delas é detalhada e apresentada no Anexo 2.

Figura 14 – Diagrama de Barton. Suportes baseados na classificação Q



Fonte: Barton, Lien e Lunde (1974).

As recomendações de suporte apresentadas foram obtidos para um seção específica de túnel com dimensões determinadas por Barton. Logo, para aplicá-las a uma seção qualquer deve-se encontrar sua dimensão equivalente. Barton propôs dividi-las por um fator ESR que depende do uso do túnel, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Fator ESR para obtenção da dimensão equivalente do túnel

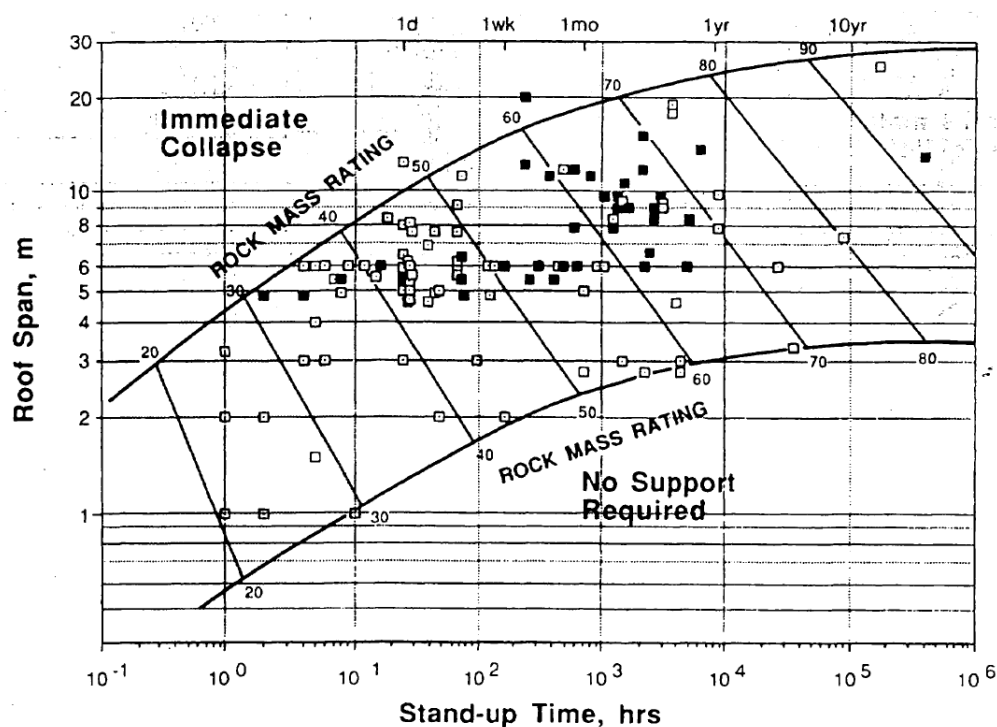
Type or use of underground opening	ESR
Temporary mine openings	3.5
Vertical shafts, rectangular and circular respectively	2.0 - 2.5
Water tunnels, permanent mine openings, adits, drifts	1.6
Storage caverns, road tunnels with little traffic, access tunnels, etc.	1.3
Power stations, road and railway tunnels with heavy traffic, civil defence shelters, etc.	1.0
Nuclear power plants, railroad stations, sport arenas, etc.	0.8

Fonte: <http://www.rockmass.net/files/short_on_Q-system.pdf>, acessado em setembro de 2018. Adaptado de Barton, Lien e Lunde (1974).

2.2.3.2 RMR - Rock Mass Rating

A metodologia RMR - *Rock Mass Rating* - foi desenvolvida por Bieniawski e primeiramente publicada em 1973, segundo Aksoy (2008), para avaliar o período de estabilidade de um vão livre escavado até que ele colapsasse. A Figura 15 ilustra a metodologia original. O próprio autor continuou desenvolvendo a metodologia e em 1974 adicionou parâmetros descritivos das descontinuidades. Em 1979 adicionou parâmetros relacionados à água subterrânea. Ainda durante a década subsequente houve por parte da comunidade de praticantes e pesquisadores de túneis um intenso debate sobre as proposições de Bieniawski e algumas melhorias foram sugeridas, porém na sua essência o método se manteve inalterado. Este processo culminou na publicação em 1989 do livro *Engineering Rock Mass Classifications* - Bieniawski (1989).

Figura 15 – Estabilidade da frente de escavação. Pontos brancos representam dados de túneis e pontos pretos dados de minas



Fonte: Bieniawski (1989).

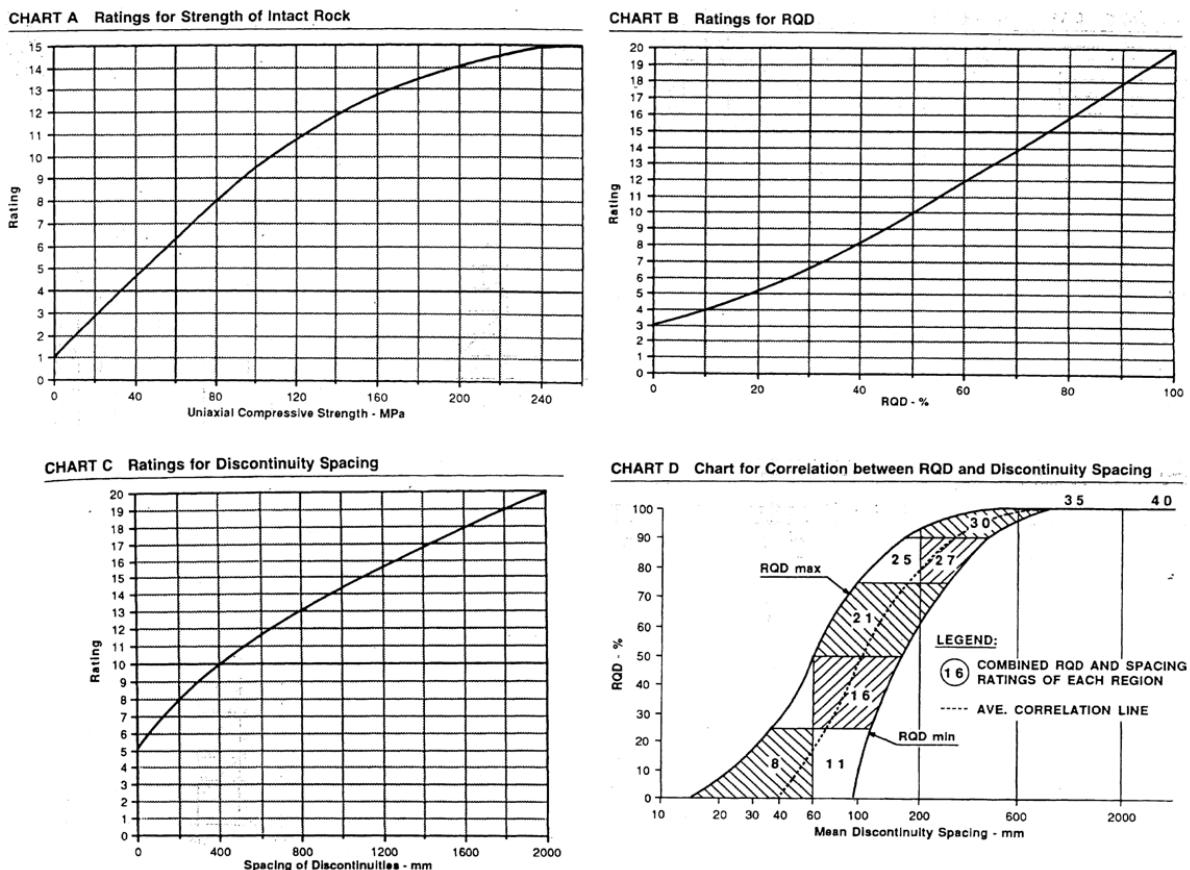
O método busca classificar o maciço atribuindo-lhe uma nota dependente de 6 parâmetros:

- resistência à compressão uniaxial;
- RQD (Anexo .1);
- espaçamento entre descontinuidades;
- condições da descontinuidade;
- condições das águas subterrâneas;
- orientação das descontinuidades.

A cada item é atribuída uma nota e ao fim são somadas as seis notas para se obter o um valor que designe a qualidade do maciço onde se deseja escavar. A nota máxima que um maciço pode receber é 100, o que caracterizaria um maciço de muito boa qualidade. A Tabela 4 apresenta a tabela proposta por Bieniawski onde distinguem-se os parâmetros e as notas que lhe são atribuídas respectivamente.

Para evitar a errônea presunção de que as notas atribuídas são valores determinísticos Bieniawski também publicou uma série de gráficos onde propõe uma correlação entre a nota e o parâmetro, como exemplificado pela Figura 16.

Figura 16 – Correlações entre notas e parâmetros



Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 4 – Sistema de pontuação do método RMR

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality <i>RQD</i>		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10-25	25-125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating	15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			> 400	300-400	200-300	100-200	< 100		
Friction angle of rock mass (deg)			> 45	35-45	25-35	15-25	< 15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)			< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation (aperture)			None	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating			6	5	3	1	0		
Infilling (gouge)			None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm		
Rating			6	4	2	2	0		
Weathering			Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Ratings			6	5	3	1	0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip-Dip 45-90°			Drive with dip-Dip 20-45°		Dip 45-90°		Dip 20-45°		
Very favourable			Favourable		Very favourable		Fair		
Drive against dip-Dip 45-90°			Drive against dip-Dip 20-45°		Dip 0-20-Irrespective of strike°				
Fair			Unfavourable		Fair				

Fonte: Bieniawski (1989).

Bieniawski (1989) ainda criou 5 categorias que dependem da nota que recebe o maciço. Para cada categoria são atribuídas recomendações sobre como proceder com o suporte da escavação caso venha-se a escavar um túnel neste maciço. Suas considerações para tanto foram para um túnel com 10 m de largura em formato de ferradura escavado pela técnica de *drill and blast* e profundidade inferior a 900m. As categorias e suas respectivas recomendações construtivas são apresentadas na Tabela 5

Tabela 5 – Classificação do maciço e recomendações de suporte

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I – Very good rock <i>RMR</i> : 81-100	Full face, 3 m advance	Generally no support required except spot bolting		
II – Good rock <i>RMR</i> : 61-80	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh	50 mm in crown where required	None
III – Fair rock <i>RMR</i> : 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5-2 m in crown and walls with wire mesh in crown	50-100 mm in crown and 30 mm in sides	None
IV – Poor rock <i>RMR</i> : 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh	100-150 mm in crown and 100 mm in sides	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required
V – Very poor rock <i>RMR</i> : < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close in- vert

Fonte: [Bieniawski \(1989\)](#).

2.2.3.3 Correlações entre as metodologias

Vários autores propuseram correlações entre ambos os índices Q e RMR . Algumas das correlações propostas são listadas a seguir:

[Moreno \(1980\)](#): $RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 55,2$

[Rutledge e Preston \(1978\)](#): $RMR = 5,9 \cdot \ln Q + 43$

[Bieniawski \(1976\)](#): $RMR = 9 \cdot \ln Q + 44$

[Cameron-Clarke e Budavari \(1981\)](#): $RMR = 5 \cdot \ln Q + 60,8$

[Abad et al. \(1984\)](#): $RMR = 10,5 \cdot \ln Q + 41,8$

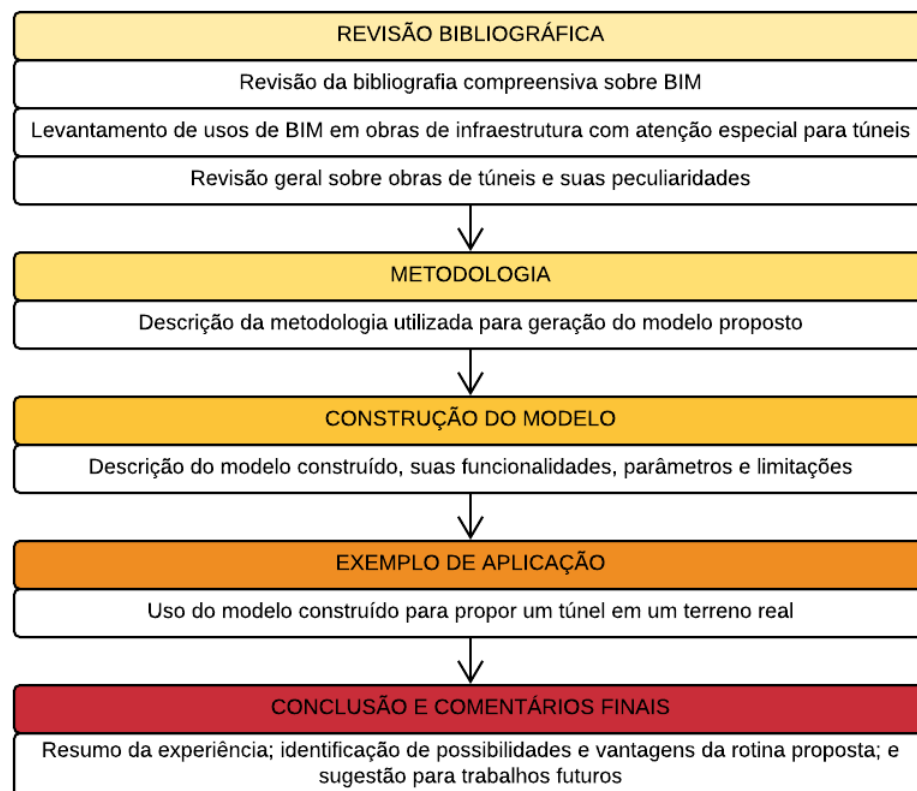
[Christofolletti \(2014\)](#) testou as correlações propostas e verificou que para valores medianos todas se assemelham muito, ficando a maior diferença por conta de casos extremos.

3 METODOLOGIA

3.1 FLUXOGRAMA DE TRABALHO

O presente trabalho foi desenvolvido de maneira progressiva, iniciando por uma busca de referenciais teóricos que abordassem temas semelhantes e posteriormente partindo para uma análise de estudo de caso da aplicação de conceitos de TIM em um projeto selecionado. As etapas seguidas no trabalho são enumeradas a seguir e ilustradas em forma de diagrama na Figura 17:

Figura 17 – Plano de trabalho



Fonte: Autor (2018).

1. Revisão bibliográfica relativa à tecnologia BIM: conceituação, benefícios, dificuldades, usos em obras civis e obras de infraestrutura. Buscou-se majoritariamente publicações internacionais devido à limitação na quantidade de nacionais;
2. Revisão bibliográfica sobre obras de túneis: composição, requerimentos, fundamentação, desafios, e estudos de caso;

3. Estudou-se as melhores aplicações disponíveis para desenvolvimento do trabalho e confeccionou-se um modelo paramétrico de túnel em BIM.
4. Selecionou-se um projeto já executado de túnel e modelou-se o mesmo em BIM utilizando o modelo confeccionado.
5. Relatam-se as vantagens e dificuldades encontradas no processo de modelagem.
6. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

3.2 MODELAGEM EM BIM

O foco do trabalho se deu na fase de pré-dimensionamento e estudos prévios de traçado. Buscou-se a formulação de um modelo capaz de gerar estimativas consistentes de quantitativos dos principais itens envolvidos no custo de construção de túneis. Dessa forma o projetista é capaz de obter rapidamente uma aferição dos custos envolvidos no traçado proposto.

Os custos relacionados à construção de um túnel podem variar drasticamente de projeto para projeto, principalmente em função das condições geológicas locais. No entanto, encontra-se uma tendência de concentração dos custos nas etapas de escavação e revestimento de suporte, como mostrou [Margason e Popock \(1970\)](#). Os resultados obtidos pelos autores são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo dos custos de construção de túneis

PROJECT	CLYDE		TYNE		BLACKWALL		DARTFORD		MERSEY		GT. CHARLES STREET BIRMINGHAM		HEATHROW CARGO	
	£/m	%	£/m	%	£/m	%	£/m	%	£/m	%	£/m	%	£/m	%
EXCAVATION PRIMARY LINING	6382	78	3967	71	7694	84	5772	81	1577	61	1250	85	797	36
SECONDARY LINING ROAD, PATHS, DRAINS	843	10	1034	19	607	7	733	10	391	15	92	6	470	21
VENTILATION LIGHTING, SERVICES	987	12	561	10	840	9	628	9	630	24	134	9	935	43
TOTAL	8212		5562		9141		7133		2598		1476		2202	

Fonte: [Margason e Popock \(1970\)](#).

Dessa forma, o modelo proposto deve estimar os seguintes quantitativos:

- Volume de material escavado;
- Volume de concreto utilizado;
- Massa de aço utilizada (tirantes e reforço por arcos de perfil metálico);
- Volume de graute utilizado nas enfilagens;

- Quantidade de tirantes, cambotas e enfilagens utilizados.

Com posse destes valores é possível obter uma estimativa rápida dos custos de construção e facilmente comparar valores relacionados a diferentes propostas de traçado.

3.2.1 Definição dos parâmetros

Os quantitativos mencionados variam conforme não só ao traçado adotado, mas também a dados geológicos e da seção transversal do túnel. Desse modo tanto o traçado quanto a configuração da seção transversal devem ser parametrizados de modo a possibilitar o projetista a testar diferentes opções.

Já para os reforços uma estimativa pode ser realizada conforme o método RMR (Seção 2.2.3.2) ou classificação Q (Seção 2.2.3.1) apresentados anteriormente. Ambos preconizam reforços por projeção de concreto reforçado com telas metálicas e uso de tirantes e/ou arcos metálicos. Logo, o modelo proposto deverá ser capaz de gerar e posicionar corretamente estes tipos de reforço ao longo da seção transversal e do alinhamento do túnel a depender da necessidade apresentada.

3.2.2 Softwares utilizados

Uma série de empresas já trabalham com metodologia BIM e disponibilizam ferramentas para que profissionais desenvolvam seus projetos de forma racional e integrada. Na busca realizada entre as principais desenvolvedoras do ramo - Autodesk, Bentley Systems, Graphisoft, Trimble, Nemetschek - encontrou-se uma lacuna no que tange a *softwares* especializados para obras de infraestrutura.

A solução encontrada foi adaptar o modelo usando um *software* comercial especializado em obras de edifícios, escolhendo-se pelo *software* Revit produzido e distribuído pela Autodesk. Esta escolha se deu pela familiaridade do autor com a ferramenta e pela facilidade de acesso garantida pela distribuidora a usuários que a utilizam com fins educacionais. Mesmo não sendo a ferramenta ideal, a solução de adaptar o *software* mostrou-se satisfatória para utilização nas fases de pré-projeto e projeto básico de túneis.

A escolha também se baseou em experiências descritas por outros praticantes como [Kuhns e Hage \(2016\)](#), [Andersen \(2017\)](#) e [Karlsruhe—Basel \(2015\)](#).

3.2.2.1 Autodesk Revit 2017

O Revit 2017 consiste de um *software* desenvolvido principalmente para arquitetos e engenheiros civis, dominando atualmente o mercado da construção civil em seu ramo. É inteiramente baseado em conceito BIM, logo todas as vistas e cortes integrados estão integradas ao modelo 3D e uma modificação em uma é automaticamente refletida nos

outros. O *software* foi utilizado para representação e parametrização do modelo. A Figura 18 ilustra um exemplo de projeto desenvolvido com o Revit.

No ambiente do Revit objetos semelhantes são agrupados em famílias. Segundo definição da Autodesk (2016):

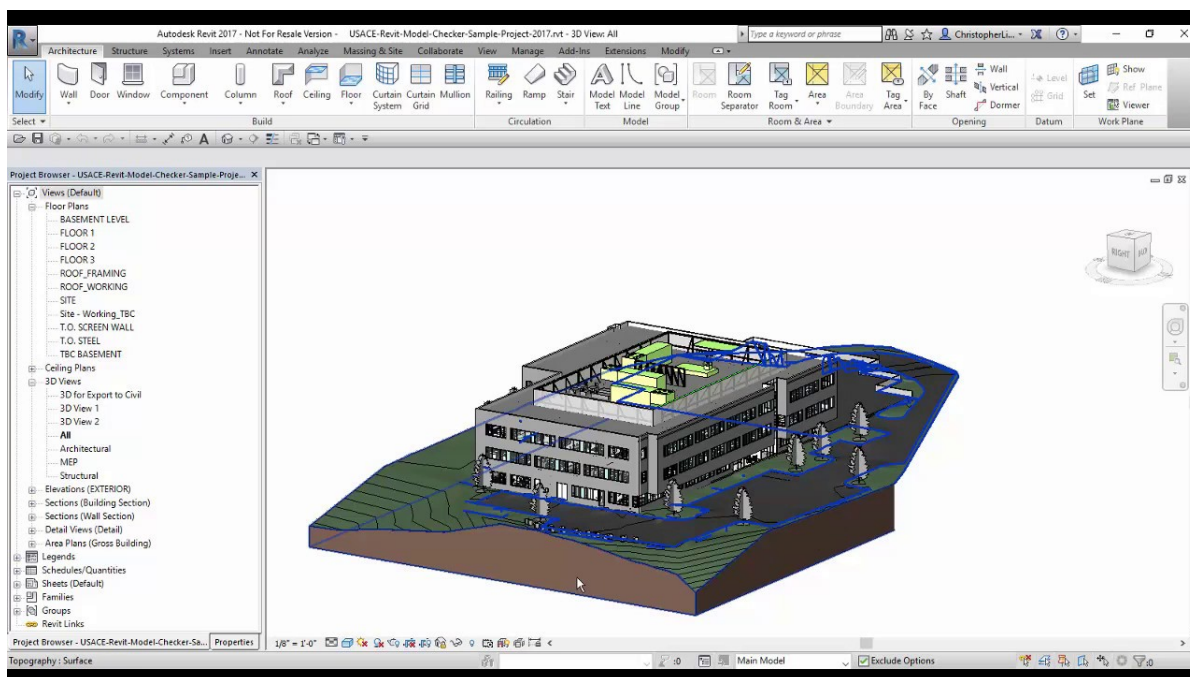
Uma família é um grupo de elementos com um conjunto comum de propriedades chamado de parâmetros e uma representação gráfica relacionada.

Os diferentes elementos pertencentes a uma família podem ter diferentes valores para alguns ou todos os parâmetros, mas o conjunto de parâmetros (seus nomes e significados) é o mesmo. Essas variações dentro da família são denominadas de *tipos de família* ou tipos. (AUTODESK, 2016)

Logo, alguns exemplos de famílias seriam: portas, paredes, ou janelas. A aplicação também permite a criação de novas famílias que difiram às embutidas no sistema.

Buscar-se-á a criação de uma nova família "túnel" que dados alguns parâmetros de entrada seja capaz de gerar o alinhamento do túnel e extrair quantitativos automaticamente, tornando-se uma interessante ferramenta para utilizar principalmente nas fases de pré-dimensionamento e estudos iniciais de traçado.

Figura 18 – Exemplo de projeto desenvolvido em Revit



Fonte: Tools (2016).

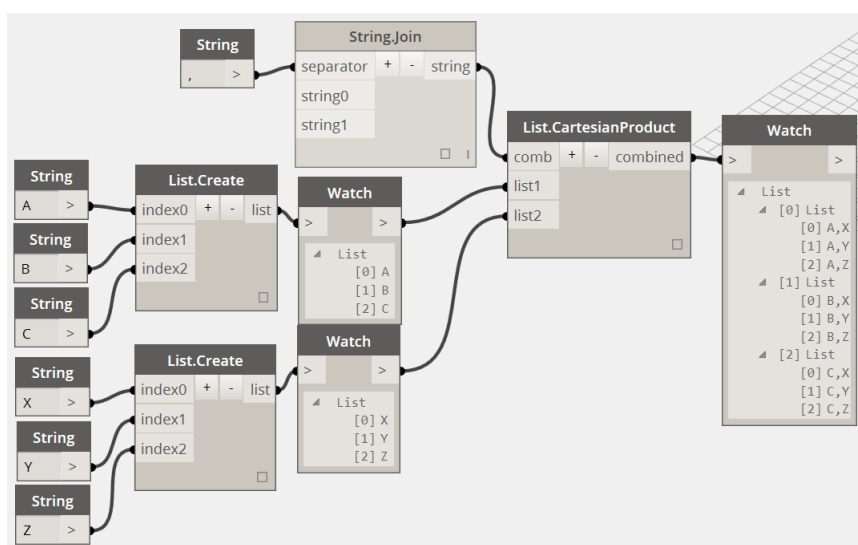
3.2.2.2 Dynamo 2.0

O Dynamo é uma linguagem de programação visual integrada ao ambiente do Autodesk Revit por meio da aplicação Dynamo Studio disponibilizado também pela

Autodesk. Esta ferramenta é utilizada para gerar funções, rotinas e aplicações que não estão presentes na versão padrão da plataforma ou automatizar tarefas. Permite também que se criem formas e geometrias não usuais. Dentro da metodologia de trabalho proposta foi utilizado para geração de todo o modelo de túnel, desde a definição dos parâmetros de entrada à análise dos resultados finais. Isto garantiu uma grande versatilidade ao proporcionar a adaptação de um *software* que por natureza não foi confeccionado para projetar obras de infraestrutura a este uso.

A lógica de funcionamento do Dynamo está balizada no uso de nós que recebem um *input* e devolvem um *output*. Há vários nós já disponíveis na versão padrão do programa e que realizam os mais variados tipos de operação. O usuário ainda pode também importar bibliotecas de outros desenvolvedores ou criar seus próprios nós conforme necessidade. Cada nó é ligado ao outro por meio de conectores, formando um grande diagrama a medida que se avança com o desenvolvimento do código. É possível também agrupar nós e nomear os grupos para facilitar a organização do código à medida que se vai aumentar o grau de complexidade. Por último, no lugar de operações de laço (em inglês *loops*) tradicionais a linguagens de programação usuais, no Dynamo os nós são configurados de forma a receber parâmetros em lista como *input* e executar a função percorrendo esta lista; logo se um nó *divisão* receber duas listas de dez itens como *input* (dividendos e divisores), o mesmo dividirá o primeiro item da primeira lista pelo primeiro item da segunda lista, o segundo item da primeira lista pelo segundo item da segunda lista e assim por diante, resultando em uma lista de 10 itens correspondentes aos resultados das divisões respectivas.

Figura 19 – Exemplo de código desenvolvido em Dynamo



Fonte: Revit (2015).

A Figura 19 exemplifica um código desenvolvido em ambiente Dynamo. No exemplo, duas listas {A, B, C} e {X, Y, Z} são criadas. Define-se um espaçador ',' e realiza-se a operação de produto cartesiano entre as listas. O resultado são três listas {(A,X), (A,Y),

$(A,Z)\}$, $\{(B,X), (B,Y), (B,Z)\}$ e $\{(C,X), (C,Y), (C,Z)\}$.

Outro aspecto interessante do ambiente Dynamo é a possibilidade de pré-visualizar o modelo. Sem que os objetos criados sejam efetivamente introduzidos no arquivo Revit, é criada uma pré-visualização dos mesmos que permite a conferência de inconsistências sem despendar muita capacidade de processamento.

É possível também introduzir blocos de código em linguagem *Python* e integrá-los à rotina do programa. Estes blocos são introduzidos como nós customizados e permitem ao usuário definir um número ilimitado de *inputs*, porém apenas um único *output* é permitido. Para contornar esta situação pode-se gerar um *output* que é uma lista de resultados e ligá-lo a um nó que divida esta lista e separe os resultados. Este recurso foi utilizado em alguns momentos onde operações específicas requisitaram uma maior complexidade de processamento.

Vale ressaltar que a aplicação possui uma comunidade de usuários consolidada e conta com vários fóruns e tutoriais online onde ocorre intensa troca de experiências e ajuda.

4 MODELAGEM

No presente trabalho, a modelagem do projeto preliminar de um túnel dá-se inteiramente no ambiente de programação Dynamo Studio, com exceção da definição do alinhamento que deve ser feita em ambiente externo e importada para o Dynamo. O projeto deve ser dividido em cinco partes básicas: alinhamento; seção transversal; reforço com tirantes; reforço com perfis de aço em arco (cambotas); e reforço com enfilagens. Todos foram parametrizados e introduzidos numa mesma rotina de cálculo, sendo possível que o usuário navegue e altere facilmente parâmetros do projeto a depender das necessidades que possuir.

4.1 PARÂMETROS DO MODELO

4.1.1 Alinhamento

Para tornar a escolha do alinhamento o mais adaptável possível, optou-se no desenvolvimento da rotina por uma entrada de dados em forma de um objeto polilinha ou spline. O mesmo é inserido dentro do modelo de projeto do Revit, podendo ser desenhado diretamente no modelador ou importado de um modelo CAD, e posteriormente selecionado na rotina de cálculo por meio de um nó que importa seu ID para o ambiente Dynamo, servindo assim de balizador do projeto.

O alinhamento servirá como linha base para operação de modelagem de sólidos *varredura* e também servirá para posicionamento dos eventuais reforços e sua correta orientação.

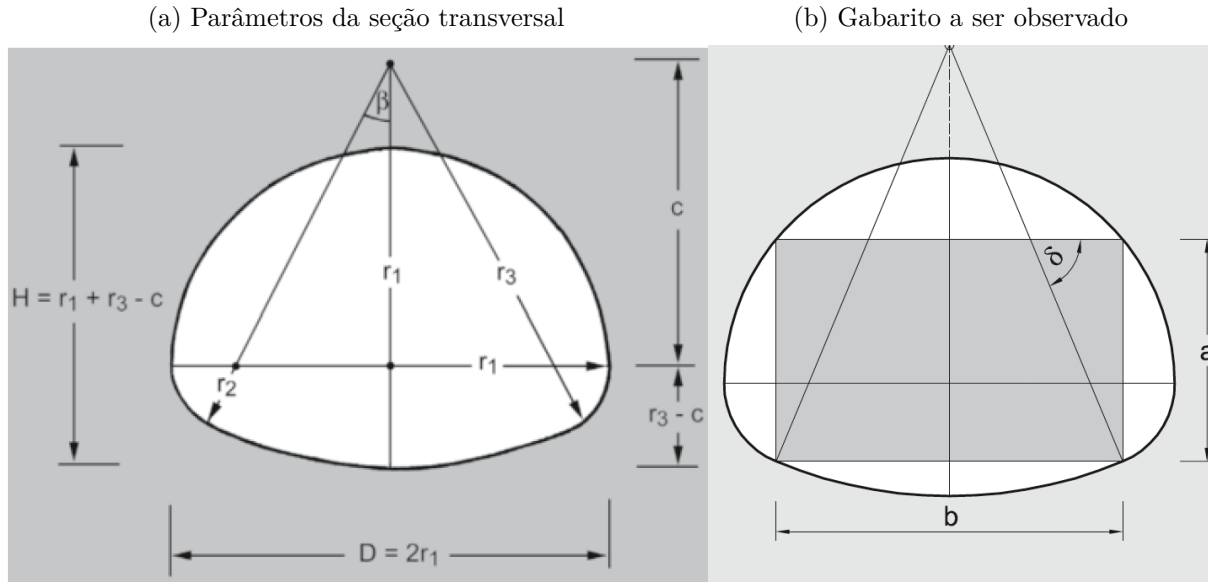
4.1.2 Seção transversal

Há inúmeras possibilidades de seções transversais em túneis. [Borrmann et al. \(2014\)](#), [Yabuki \(2009\)](#) e [Yabuki, Aruga e Furuya \(2013\)](#) comentam em suas respectivas publicações sobre as propriedades das seções e parâmetros que podem ser adotados para se definir a seção mais adequada para o projeto. Normalmente cabe ao projetista buscar uma opção que minimize a energia de deformação do maciço pois assim otimizar-se-ia o uso feito da capacidade auto-portante do maciço e minimizaria-se a necessidade de executar reforços.

No presente trabalho utilizou-se da parametrização da seção proposta por [Kolymbas \(2008\)](#), representada na Figura 20, onde a seção é composta por quatro arcos circulares, dois deles de mesmo raio. São portanto definidos três raios $r1$, $r2$ e $r3$; ficando a cargo do engenheiro responsável definir o valor respectivo de cada um de modo a respeitar o

gabarito proposto para o projeto (Figura 20). Todos os parâmetros são dados de entrada do modelo construído.

Figura 20 – Geometria da seção transversal



Fonte: Kolymbas (2008).

No código é gerada uma superfície contendo os arcos propostos que define a região do vazio - linha preta na Figura 21. Para definir a espessura de revestimento de concreto conforme projeto realiza-se uma operação de deslocamento (*offset* nas aplicações em inglês) do tamanho da espessura do túnel na superfície gerada. Como o revestimento superior é por vezes maior que as laterais e na base, substituiu-se o arco circular deslocado do topo da seção por um arco elíptico, permitindo uma maior espessura no topo - arco em azul na Figura 21. O arco que define a espessura da base é representado em vermelho na mesma figura.

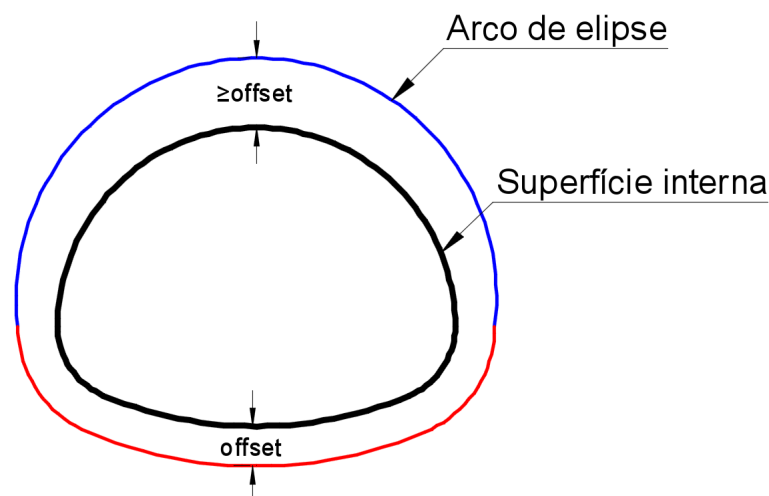
4.1.3 Reforço por tirantes

Reforços são necessários sempre que a qualidade do maciço não conferir resistência suficiente para suportar os esforços solicitantes. Um tipo comum de reforços empregado para estabilizar maciços é o uso de tirantes.

Por simplificação do modelo foram introduzidas apenas duas configurações de tirantes:

1. Distribuídos uniformemente ao longo das paredes e teto do túnel conforme a Figura 22a. $\alpha = 180^\circ / (n - 1)$, onde n é o número de tirantes.
2. Distribuídos uniformemente apenas no teto do túnel conforme a Figura 22b. $\alpha' = 90^\circ / (n - 1)$, onde n é o número de tirantes.

Figura 21 – Seção do túnel e seção deslocada modificada



Fonte: Autor (2018).

Tirantes podem ainda variar em comprimento, bitola e espaçamento ao longo do alinhamento (Figura 23). No modelo proposto ambos os parâmetros são introduzidos como dados de entrada e são mantidos constantes para todo o alinhamento selecionado.

Uma vista do modelo com tirantes pode ser observada na Figura 27a. Há ainda a opção de não utilizar tirantes para reforço.

4.1.4 Reforço por cambotas metálicas

Quando o maciço atravessado é de muito baixa qualidade pode ocorrer de o uso de tirantes isoladamente não seja suficiente para conferir-lhe a estabilidade almejada. Nestes casos, faz-se uso de outras técnicas de estabilização concomitantemente aos tirantes. Uma técnica comum no reforço de maciços instáveis é o uso de perfis metálicos em arco para ajudar a resistir aos esforços atuantes, denominadas de cambotas.

Por simplificação, os perfis adotados no modelo foram os de seção W com abas paralelas, como os mostrados na Figura 24. Para caracterizá-los foram definidos os dados de entrada que definem a seção em questão:

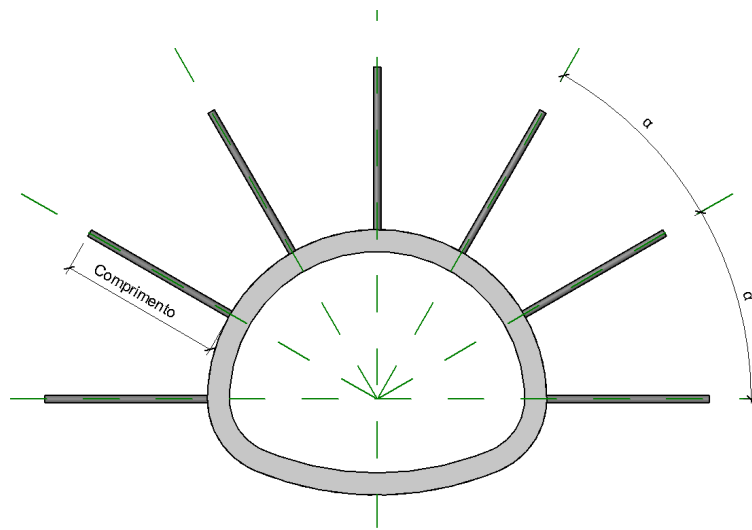
- Altura (d);
- Largura (b_f);
- Espessura da aba (t_f);
- Espessura da alma (t_w);

O presente trabalho ignorou o raio de concordância (r) a título de simplificação.

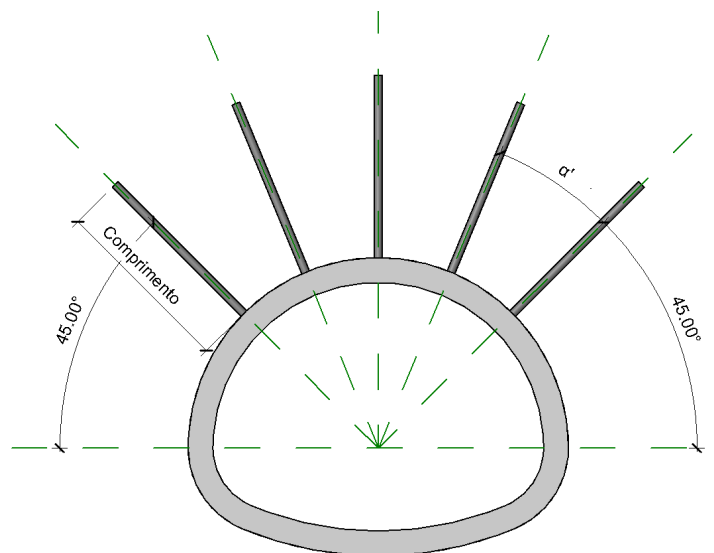
O espaçamento entre reforços também é um parâmetro de vital importância para o projeto e que foi igualmente introduzido ao modelo. Por último, assim como os tirantes é possível para o usuário eliminá-los quando não forem necessários. A Figura 25 representa

Figura 22 – Opções de distribuições de tirantes ao longo da seção

(a) Opção de tirantes distribuídos ao longo das paredes e teto



(b) Opção de tirantes distribuídos somente no teto



Fonte: Autor (2018).

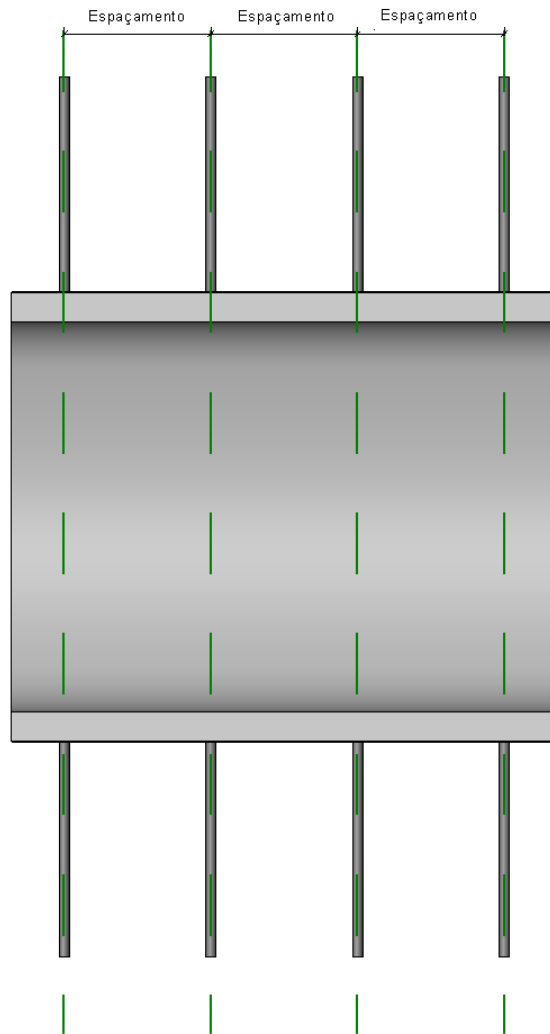
o espaçamento entre cambotas ao longo do alinhamento.

Os perfis são formados no modelo por um processo de varredura semelhante ao utilizado para construir o túnel propriamente dito. Eles se estendem tangenciando toda a parte superior do túnel formando um arco em meio círculo paralelo à parte superior da seção. A Figura 27b mostra as cambotas posicionadas no túnel.

4.2 Reforço por Enfilagens

A parametrização dos reforços por enfilagens se deu de maneira muito semelhante à adotada para reforços com tirantes descrita anteriormente. Todos os parâmetros então

Figura 23 – Tirantes distribuídos ao longo do alinhamento do túnel



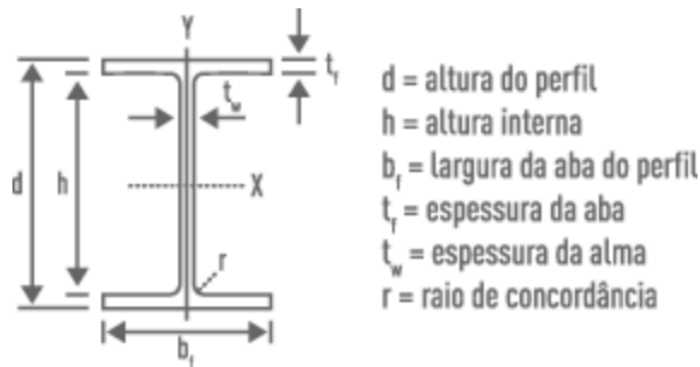
Fonte: Autor (2018).

adotados puderam ser reaproveitados no caso das enfilagens, adicionando-se apenas um novo parâmetro para definir seu ângulo de inserção com relação ao alinhamento do túnel, como ilustra a Figura 26. A Figura 27c mostra as enfilagens posicionadas no túnel.

4.3 RESULTADO

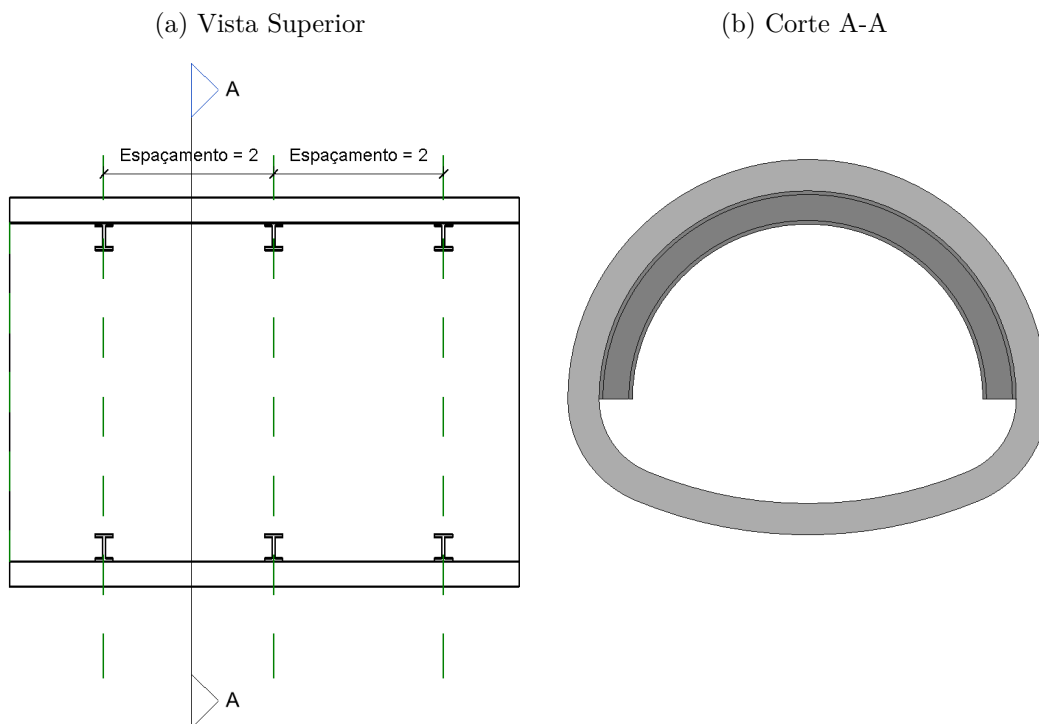
O código desenvolvido permite ao usuário selecionar quantos trechos de alinhamento forem necessários e atribuir-lhes respectivamente propriedades distintas de seção transversal e suporte. Os alinhamentos são selecionados diretamente no ambiente de trabalho Dynamo/Revit. Por outro lado, de forma a tornar a entrada de dados da seção e de estruturas de suporte mais simples, o processo foi idealizado de forma a importar estes dados de uma planilha eletrônica auxiliar. A Figura 28a mostra o ambiente de entrada de dados da aplicação.

Figura 24 – Parâmetros dos perfis metálicos W de abas paralelas



Fonte: <<http://www.acoscontinente.com.br/secao/23/perfil-w-abas-paralelas-ndash-perfil-w-i>>, acessado em outubro de 2018.

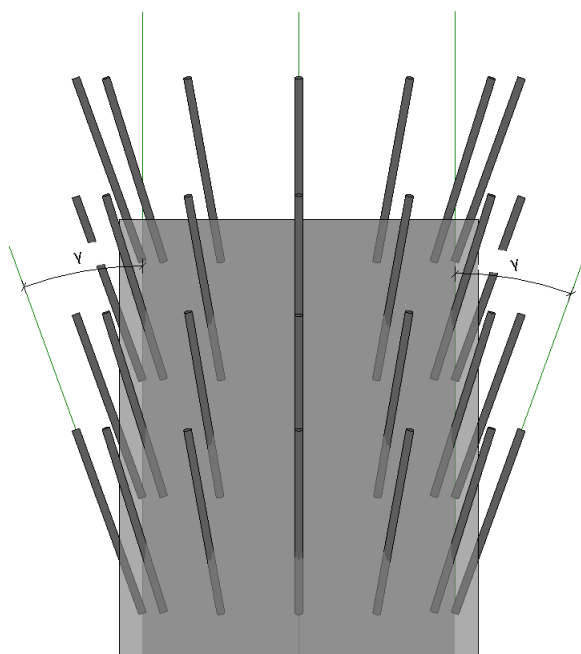
Figura 25 – Posicionamento e geometria das cambotas na seção do túnel



Fonte: Autor (2018).

O processamento do modelo não exige demasiado esforço computacional, porém importá-lo no ambiente Revit se mostrou altamente custoso computacionalmente. Para contornar este problema foi criada uma janela de resumo de resultados (Figura 28b), onde facilmente se obtêm os quantitativos desejados. O autor utilizou da pré-visualização nativa ao ambiente Dynamo para verificar inconsistência e proceder com as avaliações de melhor traçado, sendo apenas o traçado selecionado importado ao ambiente Revit.

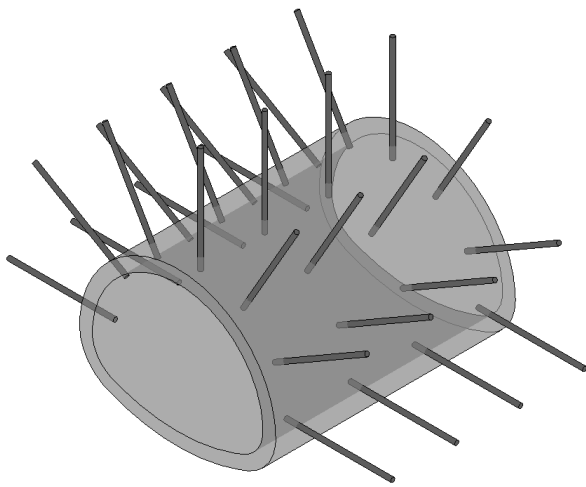
Figura 26 – Ângulo de inserção das enfilagens γ com relação ao alinhamento do túnel



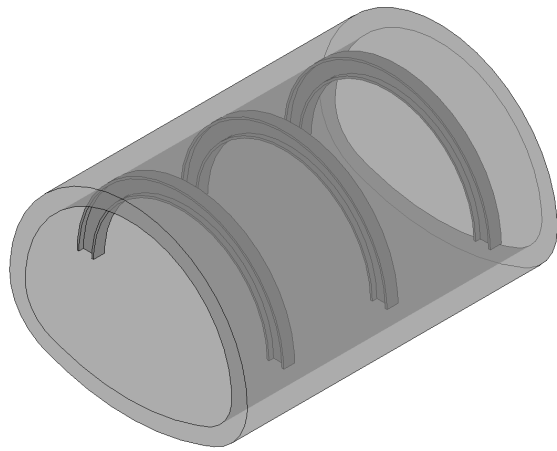
Fonte: Autor (2018).

Figura 27 – Vista isométrica do modelo

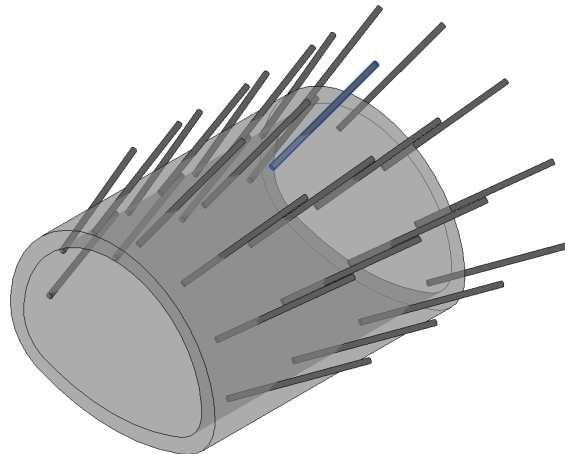
(a) Tirantes



(b) Cambotas



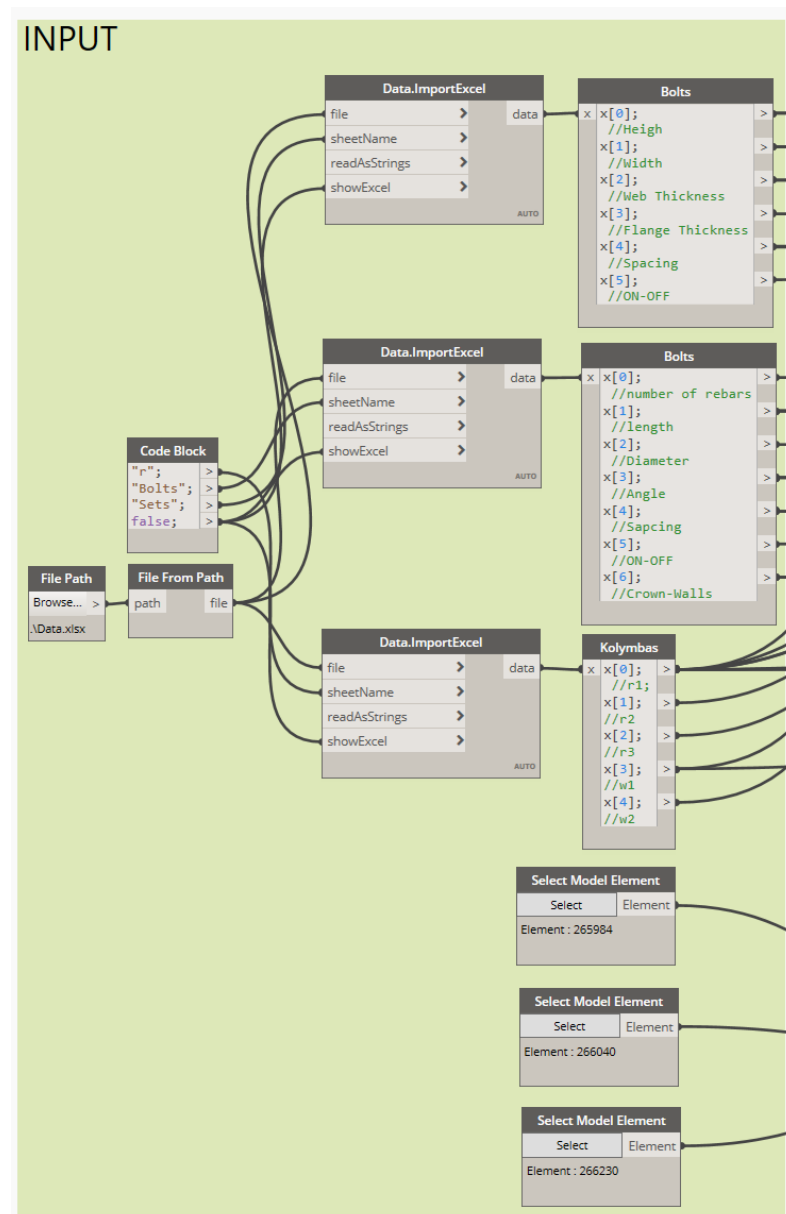
(c) Enfilagens



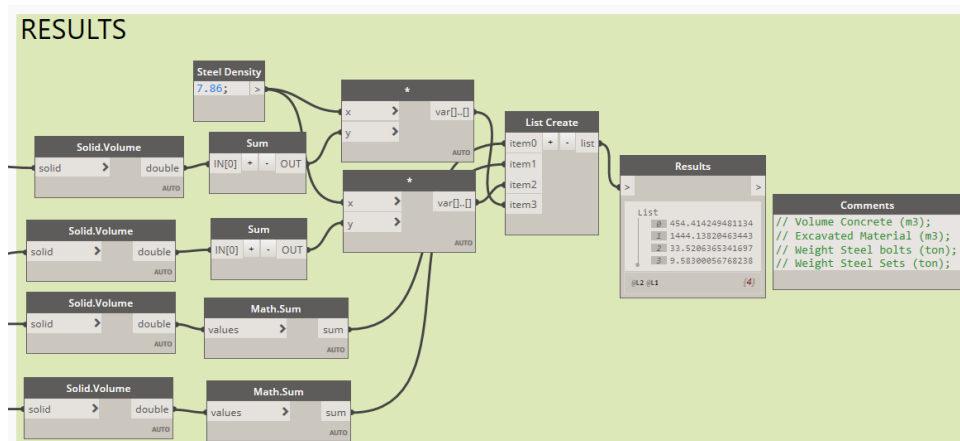
Fonte: Autor (2018).

Figura 28 – Fragmentos do código desenvolvido

(a) Input



(b) Resultados



Fonte: Autor (2018).

5 APLICAÇÃO

Para validação do modelo propõe-se a reconstituição de um projeto já executado de túnel ao qual o autor obteve acesso. Foi selecionado um projeto localizado na BR-280/SC no município de Corupá, executado pelo consórcio Iguatemi-Sotepa. O projeto em questão é composto por dois túneis paralelos com extensões de 1,04km e 1,07km.

O Anexo .3 traz uma série de documentos que detalham o projeto: projeto geométrico, perfis longitudinais, seções transversais detalhadas com os reforços estimados, e informações acerca da qualidade do material atravessado com a respectiva classificação de Bieniawski para cada trecho.

5.1 Adaptações Sugeridas para Conformação com o Modelo

Algumas adaptações no projeto tiveram de ser propostas de maneira a adequá-lo às limitações intrínsecas ao modelo proposto e mencionadas na Seção 1.4. A principal delas é o formato da seção transversal do túnel. Sua seção é em formato de ferradura, não seguindo fielmente a parametrização de Kolymbas (2008) adotada no modelo. Para contornar tal situação adotou-se uma seção que seguisse tal parametrização de área equivalente e que respeitasse o gabarito proposto para ambos os túneis. Esta proposição resulta em valores de volume escavado equivalente, ao custo de distorcer valores de volume de concreto projetado. O autor ressalta que a metodologia poderia ainda ser adaptada para o formato em questão, mas por questões de praticidade manteve-se a seção de Kolymbas. A Figura 29 mostra uma comparação entre a seção original (esquerda) e a seção equivalente adotada (direita).

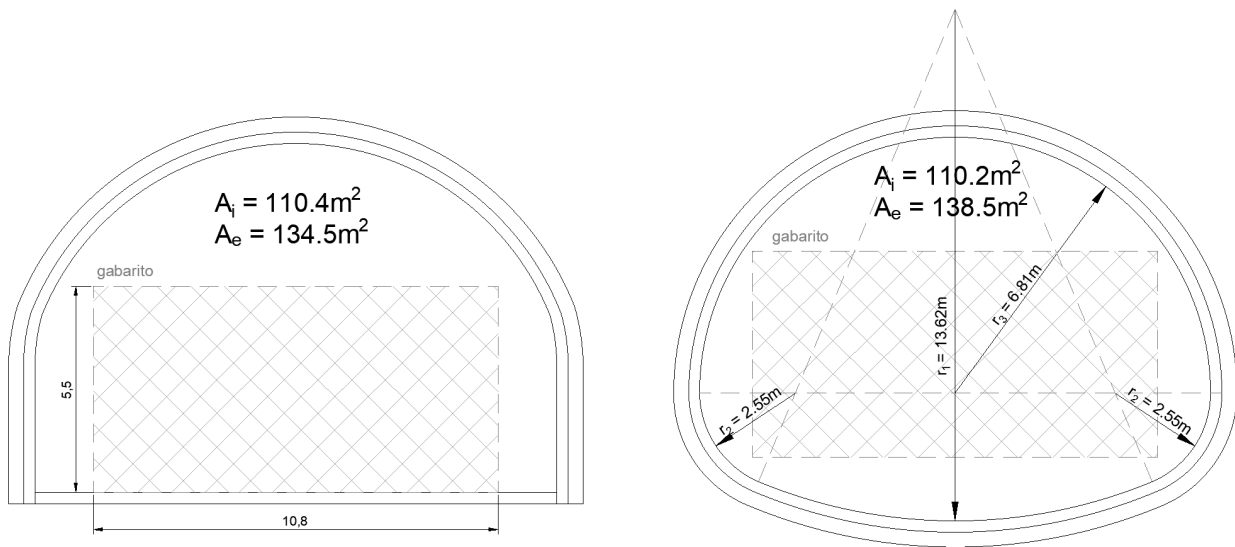
A mesma seção apresentada na Figura 29 foi utilizada para ambos os túneis.

Outra adaptação importante está relacionada ao fato de as cambotas especificadas no projeto serem compostas por treliças metálicas. Neste caso, para adaptar ao modelo adotou-se um perfil I de mesma massa linear, de modo a resultar num quantitativo de aço equivalente. O projeto original estimava uma massa de aço de 238kg para cada cambota, logo foi adotada uma seção I equivalente W150x13.0¹ com massa linear de 13,0kg/m. No modelo de seção proposta esta cambota teria 21,4m de comprimento, o que resultaria numa massa de 278,2kg por cambota, valor próximo ao original do projeto. O perfil selecionado possui as seguintes dimensões:

- Largura da aba: 100mm
- Espessura da alma: 4,3mm

¹ <<https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/perfis-estruturais-gerdau#ad-image-0>> acessado em Novembro de 2018.

Figura 29 – Comparação entre a seção original do projeto (esquerda) e a seção equivalente adotada seguindo a parametrização de Kolymbas (direita)



Fonte: Autor (2018).

- Altura do perfil: 148mm
- Espessura da aba: 4,9mm
- Área da seção transversal: 16,6cm²

As Tabelas 8 e 9 resumem as soluções de suporte adotadas no projeto para cada túnel:

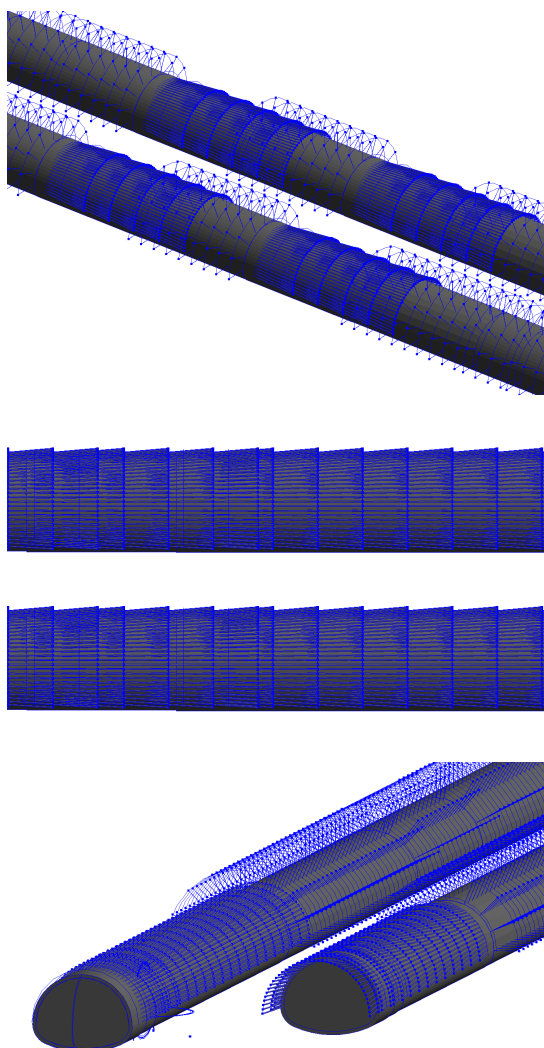
5.2 Resultado

Dentro das limitações já mencionadas impostas pelo modelo desenvolvido foi possível reproduzir com acuidade o projeto escolhido. Obteve-se com agilidade uma estimativa de quantitativos dos principais materiais utilizados na construção do túnel. Obteve-se ainda um modelo em BIM do pré-projeto do túnel que pode ser utilizado para análises mais avançadas e desenvolvido para formar os projetos básico e executivo da obra.

Devido à magnitude do projeto optou-se por não importá-lo ao ambiente Revit, operação essa que levaria horas para ser realizada. Utilizou-se no lugar da pré-visualização de modelo disponível no ambiente Dynamo. Esta última oferece uma boa perspectiva do modelo sem necessitar de elevado grau de processamento, porém possui a desvantagem de manter linhas auxiliares de modelagem visíveis. A Figura 30 mostra alguns trechos da pré-visualização de modelo dos túneis (as linhas em azul são auxiliares de desenho).

Ao fim obteve-se uma estimativa dos quantitativos desejados. Os resultados são resumidos na Tabela 7.

Figura 30 – Pré-visualização do modelo do túnel obtido com a aplicação desenvolvida



Fonte: Autor (2018).

Tabela 7 – Resumo de quantitativos obtido no *output* do modelo

Item	Quantidade
Material escavado	257.222,7m ³
Aço das cambotas	82,2ton
Aço dos tirantes	52,0ton
Graute das enfilagens	1.382,6m ³
Revestimento de concreto projetado	24.608,4m ³

Fonte: Autor (2018).

Tabela 8 – Resumo dos reforços adotados para o túnel esquerdo

Seção	Comprimento (m)	Classificação Bieniawski	Enfiagens					Tirantes				Cambotas	Concreto Projetado
			Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Espaçamento (m)	Quantidade	Ângulo de inserção (°)	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Espaçamento (m)	Quantidade	Espaçamento (m)	Espessura (cm)
1	10	SOLO	150	12	6	40	5					3	50
2	7	V	150	12	6	40	5		-			3	40
3	93	IV	150	12	6	40	5		-			3	30
4	90	III			-			25	4	3	9	-	25
5	45	II			-			25	4	3	8	-	22,5
6	110	I			-			25	4	3	7	-	20
7	45	II			-			25	4	3	8	-	22,5
8	90	III			-			25	4	3	9	-	25
9	25	IV	150	12	6	40	5		-			3	30
10	20	III			-			25	4	3	9	-	25
11	10	II			-			25	4	3	8	-	22,5
12	25	I			-			25	4	3	7	-	20
13	15	II			-			25	4	3	8	-	22,5
14	20	III			-			25	4	3	9	-	25
15	25	IV	150	12	6	40	5		-			3	30
16	25	III			-			25	4	3	9	-	25
17	25	IV	150	12	6	40	5		-			3	30
18	30	III			-			25	4	3	9	-	25
19	10	II			-			25	4	3	8	-	22,5
20	20	I			-			25	4	3	7	-	20
21	15	II			-			25	4	3	8	-	22,5
22	30	III			-			25	4	3	9	-	25
23	95	IV	150	12	6	40	5		-			3	30
24	20	V	150	12	6	40	5		-			3	40
25	170	SOLO	150	12	6	40	5		-			3	50

Fonte: Autor (2018).

Tabela 9 – Resumo dos reforços adotados para o túnel direito

Seção	Comprimento (m)	Classificação Bieniawski	Enfiagens			Tirantes			Cambotas	Concreto Projetado
			Comprimento (m)	Espaçamento (m)	Quantidade	Ângulo de inserção (°)	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Espaçamento (m)	Quantidade
1	10	SOLO	12	6	40	5				50
2	7	V	12	6	40	5			3	40
3	63	IV	12	6	40	5			3	30
4	90	III		-			25	4	3	25
5	45	II		-			25	4	3	22,5
6	110	I		-			25	4	3	20
7	45	II		-			25	4	3	22,5
8	90	III		-			25	4	3	25
9	25	IV	12	6	40	5			3	30
10	20	III		-			25	4	3	25
11	10	II		-			25	4	3	22,5
12	25	I		-			25	4	3	20
13	15	II		-			25	4	3	22,5
14	20	III		-			25	4	3	25
15	25	IV	12	6	40	5			3	30
16	25	III		-			25	4	3	25
17	25	IV	12	6	40	5			3	30
18	30	III		-			25	4	3	25
19	10	II		-			25	4	3	22,5
20	20	I		-			25	4	3	20
21	15	II		-			25	4	3	22,5
22	30	III		-			25	4	3	25
23	95	IV	12	6	40	5			3	30
24	20	V	12	6	40	5			3	40
25	170	SOLO	12	6	40	5			3	50

Fonte: Autor (2018).

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta se mostrou muito versátil e promissora para avaliação prévia de traçados de túneis. Foi possível extrair estimativas para quantitativos de volume de material escavado, volumes de concreto e graute e massa de aço utilizados com extrema rapidez e confiabilidade. Com posse desses dados o engenheiro responsável pelo projeto do túnel poderá testar várias possibilidades e fazer a escolha mais assertiva quanto a forma e traçado do túnel dadas suas restrições.

Durante a modelagem do túnel em ambiente BIM foram encontradas diversas dificuldades devido majoritariamente à ausência no mercado de opções adaptadas a modelagem de obras de infraestrutura. A própria necessidade de se confeccionar o modelo inteiramente em um ambiente mais próximo da programação que da modelagem propriamente dita mostra o estado ainda precário destas ferramentas quando aplicadas a projetos de infraestrutura. Mesmo em produções acadêmicas é latente a incipiência do tema, tendo o autor encontrado apenas um pequeno número de trabalhos que tenham sido desenvolvidos na mesma temática.

O tema no entanto é de grande interesse para profissionais que atuam na área. O BIM é visto por esses profissionais como uma metodologia capaz de lhes garantir maior confiabilidade aos projetos, diminuindo as ocorrências de incompatibilidades ou informações conflitantes que ainda ocorrem no meio. Ao poder público também interessa o uso de ferramentas em BIM uma vez que efetivamente aplicadas podem aumentar as chances de sucesso de um projeto tão complexo quanto a execução de um túnel.

A despeito dos contratempos apontados foi possível desenvolver um modelo versátil e pô-lo a teste. Foi replicado com êxito um projeto de relativo grau de complexidade, onde foi feito uso de diversas técnicas de suporte em um total de 50 trechos de características distintas. O resultado obtido foi muito satisfatório e foi possível aferir com agilidade uma estimativa de consumo de materiais para o projeto.

Espera-se que tal ferramenta possa balizar uma escolha apropriada do melhor caminho a se tomar durante as primeiras definições de um projeto de túneis, auxiliando os profissionais envolvidos a tomarem decisões conscientes.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Objetivando a continuidade do trabalho, sugere-se:

- Expandir o escopo para mais modelos de túneis e configurações de suporte;
- Integrar o modelo a uma rotina de cálculo em elementos finitos para determinação das estruturas de suporte necessárias;
- Incorporar algoritmos de otimização da seção transversal e do traçado do túnel na rotina elaborada;
- Prosseguir com o detalhamento do projeto de forma a conceber um modelo de projeto executivo do túnel em BIM.

Referências

- ABAD, J. et al. Application of geomechanical classification to predict the convergence of coal mine galleries and to design their supports. *5th International Congress on Rock Mechanics*, p. 15–19, 1984. Citado na página 44.
- AKSOY, C. O. Review of rock mass rating classification : Historical developments, applications, and restrictions. v. 44, n. January, p. 51–63, 2008. Citado na página 41.
- ANDERSEN, T. *Tunnel and Infrastructure Modeling with Dynamo and Revit*. 2017. <<http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/classes/year-2017/revit/ci124341#chapter=0>>, Acessado em: 11/09/2018. Citado na página 47.
- AUTODESK, I. *Guia de ajuda Revit: Sobre as Famílias*. 2016. <<http://help.autodesk.com/view/RVT/2016/PTB/?guid=GUID-6DDC1D52-E847-4835-8F9A-466531E5FD29>>, Acessado em: 11/09/2018. Citado na página 48.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, v. 6, p. 189–236, 1974. Citado 11 vezes nas páginas 11, 18, 37, 39, 40, 41, 76, 77, 78, 79 e 80.
- BICKEL, J. O.; KUESEL, T. R.; KING, E. H. *Tunnel engineering handbook*. 2. ed. New York: Springer, 1996. 528 p. Citado na página 32.
- BIENIAWSKI, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. *Proceedings of the symposium Exploration for Rock Engineering*, v. 1, p. 97–106, 1976. Citado na página 44.
- BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering Rock Mass Classifications*. 1st. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1989. 251 p. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 43 e 44.
- BORRMANN, A. et al. Synchronous collaborative tunnel design based on consistency-preserving multi-scale models. *Advanced Engineering Informatics*, v. 28, n. 4, p. 499–517, 2014. Citado na página 51.
- BROERE, W. Urban underground space : Solving the problems of today's cities. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, Elsevier Ltd, v. 55, p. 245–248, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.012>>. Citado na página 19.
- CAMERON-CLARKE, I. S.; BUDAVARI, S. Correlation of rock mass classification parameters obtained from borecore and in-situ observations. *Engineering Geology*, v. 17, p. 19–53, 1981. Citado na página 44.
- CHAPMAN, D.; METJE, N.; STÄRK, A. *Introduction to Tunnel Construction*. [S.l.: s.n.], 2010. 390 p. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- CHONG, H. Y. et al. Comparative Analysis on the Adoption and Use of BIM in Road Infrastructure Projects. *Journal of construction engineering and management*, v. 32, n. 6, p. 1–13, 2016. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000460](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000460)>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

- CHRISTOFOLLETTI, C. *Correlação entre as classificações geomecânicas RMR e Q e sua relevância geológica*. 310 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2014. Citado na página 44.
- CZMOCH, I.; PEKALA, A. Traditional design versus BIM based design. *Procedia Engineering*, v. 91, p. 210–215, 2014. Citado na página 24.
- DALLER, J. et al. Implementation of BIM in the tunnel design – Engineering consultant's aspect. *Geomechanik und Tunnelbau*, v. 9, n. 6, p. 674–683, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- DEERE, D. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, p. 16–22, 1964. Citado 3 vezes nas páginas 18, 31 e 75.
- DIN. *DIN 18551. Sprayed Concrete: Production and Inspection*. Berlin, 2005. Citado na página 35.
- EASTMAN, C. et al. *BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. 2nd. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. 611 p. Citado na página 24.
- FANNING, B. et al. Implementing BIM on Infrastructure: Comparison of Two Bridge Construction Projects. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, v. 20, n. 4, 2015. Citado na página 27.
- FRANÇA, P. T. *Estudo Do Comportamento De Túneis - Análise Numérica Tridimensional com Modelos Elasto-Plásticos*. 185 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2006. Citado na página 32.
- GAO, S.-m. et al. Structure optimization for the support system in soft rock tunnel based on numerical analysis and field monitoring. v. 34, 05 2016. Citado na página 36.
- JÚNIOR, J. P. et al. Análise de casos práticos da adoção do processo BIM em empreendimentos de infraestrutura. In: *4º Congresso Brasileiro de túneis e estruturas subterrâneas*. [s.n.], 2017. p. 15. Disponível em: <<http://www.neopixdmi.com.br/@mci/4cvt/>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 28 e 29.
- KARLSRUHE—BASEL, B. *Nutzung von Building Information Modeling (BIM) im Pilotprojekt Tunnel Rastatt*. 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=-TCm5C_R8v0>, Acessado em: 11/09/2018. Citado na página 47.
- KIM, H.; CHEN, Z.; CHO, C.-S. Integration of BIM and GIS: Highway Cut and Fill Earthwork Balancing. *Computing in Civil Engineering*, n. January, p. 468–474, 2015. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84936882236&partnerID=tZOtx3y1>>. Citado na página 27.
- KOCH, C.; VONTHRON, A.; KÖNIG, M. A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunnelling projects. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 83, p. 78–90, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.07.006>>. Citado na página 28.
- KOLYMBAS, D. *Tunnelling and Tunnel Mechanics*. 2nd. ed. Berlin: [s.n.], 2008. 439 p. Citado 6 vezes nas páginas 32, 35, 37, 51, 52 e 61.

- KUHNS, L.; HAGE, S. *Tunnel Modeling for BIM—Tools for Success: AutoCAD Civil 3D, Revit, and InfraWorks 360*. 2016. <<http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/2016/autocad-civil-3d/tr22133#chapter=0>>, Acessado em: 11/09/2018. Citado na página 47.
- LÜ, Z.-P. X. Q.; JIAN, J.; ZHENG, J. Reliability based design optimization for a rock tunnel support system with multiple failure modes using response surface method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 70, p. 1 – 10, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779816304965>>. Citado na página 36.
- MAIDL, B.; THEWES, M.; MAIDL, U. *Handbook of Tunnel Engineering I: Structures and Methods*. 1st. ed. Berlin: Ernst & Sohn, 2013. 454 p. Citado 5 vezes nas páginas 21, 32, 33, 34 e 36.
- MARGASON, G.; POPOCK, R. G. *A preliminary study of the cost of tunnel construction*. Crowthorne, Berkshire, 1970. 36 p. Disponível em: <<https://trl.co.uk/reports/LR326>>. Citado na página 46.
- MINAGAWA, M.; KUSAYANAGI, S. Study on BIM utilization for design improvement of infrastructure project. *Procedia Engineering*, Elsevier B.V., v. 125, p. 431–437, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.113>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- MORENO, T. Aplicación de las clasificaciones geomecánicas a los túneles de pajares. *II Curso de Sostenimientos Activos en Galerías y Túneles*, p. 71–76, 1980. Citado na página 44.
- NOGUEIRA, J. d. S. *Análise dos benefícios do BIM no combate às irregularidades em projetos de obras de edificações públicas e seus aditivos contratuais*. 125 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/171357>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- OSELLO, A.; RAPETTI, N.; SEMERARO, F. BIM Methodology Approach to Infrastructure Design: Case Study of Paniga Tunnel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 245, n. 6, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIĆ, L. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*. [S.l.]: Thomas Telford Publishing, 1999. 448 p. Citado na página 31.
- POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIĆ, L. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*. [S.l.]: Thomas Telford Publishing, 1999. 440 p. Citado na página 31.
- REVIT, E. *Examples for All List Actions in DYNAMO*. 2015. <<http://plevit1.blogspot.com/2015/01/examples-for-all-list-actions-in-dynamo.html?m=1>>, Acessado em: 03/12/2018. Citado na página 49.
- RUTLEDGE, C. J.; PRESTON, R. L. Experience with engineering classification of rock. *Proceedings International Tunnelling Syrup*, A3, p. 1–7, 1978. Citado na página 44.
- SANTA CATARINA, G. *Caderno De Apresentação De Projetos Em Bim*. Florianópolis, 2013. 98 p. Citado na página 23.

SCHIAVINATO, L. et al. BIM Use in the Infrastructural Field : The Case of the Extension of the Railway in the Underground Track of Catania , From the Central Station F.S. to the Airport. *ITA AITES WTC 2016*, San Francisco, n. April, p. 1–9, 2016. Citado na página 28.

TECNOGEO, K. *Enfilagem / DHPs / Injeções de Consolidação (obras de Túneis)*. 2018. <<http://www.tecnogeo.com.br/enfilagem-dhps-injecoes-consolidacao-obras-tuneis>>, Acessado em: 03/12/2018. Citado na página 36.

TEMPLE, M. W. B.; STUKHART, G. Cost Effectiveness of Geotechnical Investigations. *Journal of Management in Engineering*, v. 3, n. 1, p. 8–19, 1987. Citado na página 30.

TOMA, H.; JODL, H. Selecting efficient support methods for tunnels. *Internation Symposium on: Utilization of underground space in Urban areas*, p. 8, 2006. Citado na página 36.

TOOLS, B. I. *Model Checker for Revit - Sample Models*. 2016. <<https://www.youtube.com/watch?v=W4slchCdWFs>>, Acessado em: 03/12/2018. Citado na página 48.

UNITED NATIONS. The World's Cities in 2016: Data Booklet. *Economic and Social Affairs*, p. 29, 2016. Disponível em: <<http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the{ }worlds{ }cities{ }in{ }2016{ }data{ }booklet.pdf>>. Citado na página 19.

WALASEK, D.; BARSZCZ, A. Analysis of the Adoption Rate of Building Information Modeling [BIM] and its Return on Investment [ROI]. *Procedia Engineering*, Elsevier B.V., v. 172, p. 1227–1234, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.144>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

YABUKI, N. Representation of caves in a shield tunnel product model. *Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Construction*, p. 545–550, 2009. Citado na página 51.

YABUKI, N.; ARUGA, T.; FURUYA, H. Development and application of a product model for shield tunnels. *Proceedings of the 30th ISARC*, 2013. Citado na página 51.

Anexos

.1 RQD - ROCK QUALITY DESIGNATION (DEERE, 1964)

Mensurar a qualidade de um maciço rochoso através da análise de testemunhos retirados do mesmo era uma tarefa muito subjetiva. Técnicos e especialistas examinavam a qualidade do material extraído e baseados em sua experiência profissional determinavam sua adequação para execução de escavações. Em 1964 Deere propôs uma metodologia para estimar a qualidade do maciço sem recorrer a subjetividades, criando o RQD - em inglês *Rock Quality Designation*.

Idealizado para ser um mensurador de fácil obtenção, o RQD é o coeficiente da soma dos comprimentos dos segmentos do testemunho com mais de 10cm de comprimento e o comprimento total do testemunho - Equação 1.

$$RQD = \frac{\sum L_{10}}{L_{total}} \quad (1)$$

Onde:

L_{10} = comprimento do segmento com mais de 10cm

L_{total} = comprimento total do testemunho

2 CONFIGURAÇÕES DE REVESTIMENTO (BARTON; LIEN; LUNDE, 1974)

Tabela 10 – Suporte para maciços com Q entre 10 - 1000

Support category	Q	Conditional factors			P kg/cm ² (approx.)	SPAN/ ESR (m)	Type of support	Note see p. 229
		RQD/ J _n	J _r /J _n	SPAN/ ESR (m)				
1*	1000—400	—	—	—	< 0.01	20—40	sb (utg)	—
2*	1000—400	—	—	—	< 0.01	30—60	sb (utg)	—
3*	1000—400	—	—	—	< 0.01	46—80	sb (utg)	—
4*	1000—400	—	—	—	< 0.01	65—100	sb (utg)	—
5*	400—100	—	—	—	0.05	12—30	sb (utg)	—
6*	400—100	—	—	—	0.05	19—45	sb (utg)	—
7*	400—100	—	—	—	0.05	30—65	sb (utg)	—
8*	400—100	—	—	—	0.05	48—88	sb (utg)	—
9	100—40	≥ 20	—	—	0.25	8.5—19	sb (utg)	—
		< 20	—	—			B (utg) 2.5—3 m	—
10	100—40	≥ 30	—	—	0.25	14—30	B (utg) 2—3 m	—
		< 30	—	—			B (utg) 1.5—2 m + clm	—
11*	100—40	≥ 30	—	—	0.25	23—48	B (tg) 2—3 m	—
		< 30	—	—			B (tg) 1.5—2 m + clm	—
12*	100—40	≥ 30	—	—	0.25	40—72	B (tg) 2—3 m	—
		< 30	—	—			B (tg) 1.5—2 m + clm	—
13	40—10	≥ 10	≥ 1.5	—	0.5	5—14	sb (utg)	I
		≥ 10	< 1.5	—			B (utg) 1.5—2 m	I
		< 10	≥ 1.5	—			B (utg) 1.5—2 m	I
		< 10	< 1.5	—			B (utg) 1.5—2 m + S 2—3 cm	I
14	40—10	≥ 10	—	≥ 15	0.5	9—23	B (tg) 1.5—2 m + clm	I, II
		< 10	—	≥ 15			B (tg) 1.5—2 m + S (mr) 5—10 cm	I, II
		—	—	< 15			B (utg) 1.5—2 m + clm	I, III
15	40—10	> 10	—	—	0.5	15—40	B (tg) 1.5—2 m + clm	I, II, IV
		≥ 10	—	—			B (tg) 1.5—2 m + S (mr) 5—10 cm	I, II, IV
16*	40—10	> 15	—	—	0.5	30—65	B (tg) 1.5—2 m + clm	I, V, VI
See note XII		≤ 15	—	—			B (tg) 1.5—2 m + S (mr) 10—15 cm	I, V, VI

* Authors' estimates of support. Insufficient case records available for reliable estimation of support requirements.

The type of support to be used in categories 1 to 8 will depend on the blasting technique. Smooth wall blasting and thorough barring-down may remove the need for support. Rough-wall blasting may result in the need for single applications of shotcrete, especially where the excavation height is >25 m. Future case records should differentiate categories 1 to 8.

Key to Support Tables:

sb = spot bolting
B = systematic bolting
(utg) = untensioned, grouted

Fonte: BARTON; LIEN; LUNDE (1974).

Tabela 11 – Suporte para maciços com Q entre 1 - 10

Support category	Q	Conditional factors			P Kg/cm ² (approx.)	SPAN/ ESR (m)	Type of support	Note See p. 229
		RQD/J _n	J _r /J _a	SPAN/ ESR				
17	10—4	> 30	—	—	1.0	3.5—9	sb (utg)	I
		≥ 10, ≤ 30	—	—			B (utg) 1—1.5 m	I
		< 10	—	≥ 6 m			B (utg) 1—1.5 m + S 2—3 cm	I
		< 10	—	< 6 m			S 2—3 cm	I
18	10—4	> 5	—	≥ 10 m	1.0	7—15	B (tg) 1—1.5 m + clm	I, III
		> 5	—	< 10 m			B (utg) 1—1.5 m + clm	I
		≤ 5	—	≥ 10 m			B (tg) 1—1.5 m + S 2—3 cm	I, III
		≤ 5	—	< 10 m			B (utg) 1—1.5 m + S 2—3 cm	I
19	10—4	—	—	≥ 20 m	1.0	12—29	B (tg) 1—2 m + S (mr) 10—15 cm	I, II, IV
		—	—	< 20 m			B (tg) 1—1.5 m + S (mr) 5—10 cm	I, II
20* See note XII	10—4	—	—	≥ 35 m	1.0	24—52	B (tg) 1—2 m + S (mr) 20—25 cm	I, V, VI
		—	—	< 35 m			B (tg) 1—2 m + S (mr) 10—20 cm	I, II, IV
21	4—1	≥ 12.5	≤ 0.75	—	1.5	2.1—6.5	B (utg) 1 m + S 2—3 cm	I
		< 12.5	≤ 0.75	—			S 2.5—5 cm	I
		—	> 0.75	—			B (utg) 1 m	I
22	4—1	> 10, < 30	> 1.0	—	1.5	4.5—11.5	B (utg) 1 m + clm	I
		≤ 10	> 1.0	—			S 2.5—7.5 cm	I
		< 30	≤ 1.0	—			B (utg) 1 m + S (mr) 2.5—5 cm	I
		≥ 30	—	—			B (utg) 1m	I
23	4—1	—	—	≥ 15 m	1.5	8—24	B (tg) 1—1.5 m + S (mr) 10—15 cm	I, II, IV, VII
		—	—	< 15 m			B (utg) 1—1.5 m + S (mr) 5—10 m	I
24* See note XII	4—1	—	—	≥ 30 m	1.5	18—46	B (tg) 1—1.5 m + S (mr) 15—30 cm	I, V, VI
		—	—	< 30 m			B (tg) 1—1.5 m + S (mr) 10—15 cm	I, II, IV

* Authors' estimates of support. Insufficient case records available for reliable estimation of support requirements.

(tg) = tensioned, (expanding shell type for competent rock masses, grouted post-tensioned in very poor quality rock masses; see Note XI)

S = shotcrete

(mr) = mesh reinforced

clm = chain link mesh

CCA = cast concrete arch

(sr) = steel reinforced

Bolt spacings are given in metres (m). Shotcrete, or cast concrete arch thickness is given in centimetres (cm).

Fonte: BARTON; LIEN; LUNDE (1974).

Tabela 12 – Suporte para maciços com Q entre 0,1 - 1

Support category	Q	Conditional factors R_{QD}/J_n J_r/J_a		SPAN/ESR (m)	P kg/cm ² (approx.)	SPAN/ESR (m)	Type of support	Note See p. 229
25	1.0—0.4	>10	>0.5	—	2.25	1.5—4.2	B (utg) 1 m+mr or clm	I
		≤10	>0.5	—			B (utg) 1 m+S (mr) 5 cm	I
		—	≤0.5	—			B (tg) 1 m+S (mr) 5 cm	I
26	1.0—0.4	—	—	—	2.25	3.2—7.5	B (tg) 1 m + S (mr) 5—7.5 cm	VIII, X, XI
		—	—	—			B (utg) 1 m+S 2.5—5 cm	I, IX
27	1.0—0.4	—	—	≥12 m	2.25	6—18	B (tg) 1 m + S (mr) 7.5—10 cm	I, IX
		—	—	<12 m			B (utg) 1 m + S (mr) 5—7.5 cm	I, IX
		—	—	>12 m			CCA 20—40 cm + B (tg) 1 m	VIII, X, XI
		—	—	<12 m			S (mr) 10—20 cm + B (tg) 1 m	VIII, X, XI
		—	—	—			—	—
28* See note XII	1.0—0.4	—	—	≥30 m	2.25	15—38	B (tg) 1 m + S (mr) 30—40 cm	I, IV, V, IX
		—	—	≥20, <30			B (tg) 1 m + S (mr) 20—30 cm	I, II, IV, IX
		—	—	<20 m			B (tg) 1 m + S (mr) 15—20 cm	I, II, IX
		—	—	—			CCA (sr) 30—100 cm + B (tg) 1 m	IV, VIII, X, XI
29*	0.4—0.1	>5	>0.25	—	3.0	1.0—3.1	B (utg) 1 m+S 2—3 cm	—
		≤5	>0.25	—			B (utg) 1 m+S (mr) 5 cm	—
		—	≤0.25	—			B (tg) 1 m+S (mr) 5 cm	—
30	0.4—0.1	≥5	—	—	3.0	2.2—6	B (tg) 1 m+S 2.5—5 cm	IX
		<5	—	—			S (mr) 5—7.5 cm	IX
		—	—	—			B (tg) 1 m + S (mr) 5—7.5 cm	VIII, X, XI
31	0.4—0.1	>4	—	—	3.0	4—14.5	B (tg) 1 m + S (mr) 5—12.5 cm	IX
		≤4, ≥1.5	—	—			S (mr) 7.5—25 cm	IX
		<1.5	—	—			CCA 20—40 cm + B (tg) 1 m	IX, XI
		—	—	—			CCA (sr) 30—50 cm + B (tg) 1 m	VIII, X, XI
		—	—	—			—	—
32 See note XII	0.4—0.1	—	—	≥20 m	3.0	11—34	B (tg) 1 m + S (mr) 40—60 cm	II, IV, IX, XI
		—	—	<20 m			B (tg) 1 m + S (mr) 20—40 cm	III, IV, IX, XI
		—	—	—			CCA (sr) 40—120 cm + B (tg) 1 m	IV, VIII, X, XI

* Authors' estimates of support. Insufficient case records available for confident prediction of support requirements.

Fonte: BARTON; LIEN; LUNDE (1974).

Tabela 13 – Suporte para maciços com Q entre 0,001 - 0,1

Support category	Q	Conditional Factors RQD/J_n J_r/J_a		SPAN/ESR (m)	P Kg/cm ² (approx.)	SPAN/ESR (m)	Type of support	Note See p. 229
33*	0.1—0.01	≥ 2	—	—	6	1.0—3.9	B (tg) 1 m + S (mr) 2.5—5 cm	IX
		< 2	—	—			S (mr) 5—10 cm	IX
		—	—	—			S (mr) 7.5—15 cm	VIII, X
34	0.1—0.01	≥ 2	≥ 0.25	—	6	2.0—11	B (tg) 1 m + S (mr) 5—7.5 cm	IX
		< 2	≥ 0.25	—			S (mr) 7.5—15 cm	IX
		—	< 0.25	—			S (mr) 15—25 cm	IX
		—	—	—			CCA (sr) 20—60 cm + B (tg) 1 m	VIII, X, XI
35 See note XII	0.1—0.01	—	—	≥ 15 m	6	6.5—28	B (tg) 1 m + S (mr) 30—100 cm	II, IX, XI
		—	—	≥ 15 m			CCA (sr) 60—200 cm + B (tg) 1 m	VIII, X, XI, II
		—	—	< 15 m			B (tg) 1 m + S (mr) 20—75 cm	IX, XI, III
		—	—	< 15 m			CCA (sr) 40—150 cm + B (tg) 1 m	VIII, X, XI, III
		—	—	—			—	—
36*	0.01—0.001	—	—	—	12	1.0—2.0	S (mr) 10—20 cm	IX
		—	—	—			S (mr) 10—20 cm + B (tg) 0.5—1.0 m	VIII, X, XI
37	0.01—0.001	—	—	—	12	1.0—6.5	S (mr) 20—60 cm	IX
		—	—	—			S (mr) 20—60 cm	VIII, X, XI
		—	—	—			+ B (tg) 0.5—1.0 m	—
38 See note XIII	0.01—0.001	—	—	≥ 10 m	12	4.0—20	CCA (sr) 100—300 cm	IX
		—	—	≥ 10 m			CCA (sr) 100—300 cm + B (tg) 1 m	VIII, X, II, XI
		—	—	< 10 m			S (mr) 70—200 cm	IX
		—	—	< 10 m			S (mr) 70—200 cm	VIII, X, III, XI
		—	—	—			+ B (tg) 1 m	—

* Authors' estimates of support. Insufficient case records available for confident prediction of support requirements.

Fonte: BARTON; LIEN; LUNDE (1974).

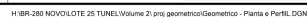
Figura 31 – Recomendações para uso das tabelas de determinação do suporte propostas por Barton

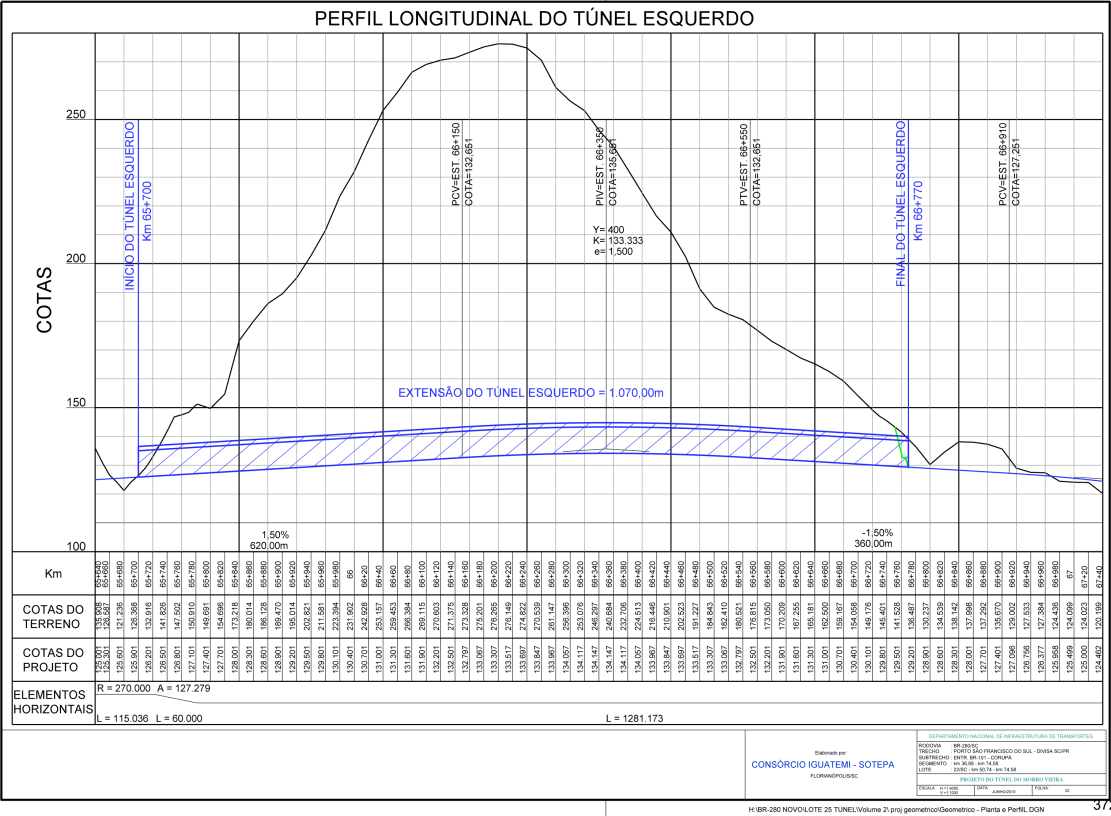
Supplementary Notes for Support Tables

- I. For cases of heavy rock bursting or “popping”, tensioned bolts with enlarged bearing plates often used, with spacing of about 1 m (occasionally down to 0.8 m). Final support when “popping” activity ceases.
- II. Several bolt lengths often used in same excavation, i. e. 3, 5 and 7 m.
- III. Several bolt lengths often used in same excavation, i. e. 2, 3 and 4 m.
- IV. Tensioned cable anchors often used to supplement bolt support pressures. Typical spacing 2—4 m.
- V. Several bolt lengths often used in some excavations, i.e. 6, 8 and 10 m.
- VI. Tensioned cable anchors often used to supplement bolt support pressures. Typical spacing 4—6 m.
- VII. Several of the older generation power stations in this category employ systematic or spot bolting with areas of chain link mesh, and a free span concrete arch roof (25—40 cm) as permanent support.
- VIII. Cases involving swelling, for instance montmorillonite clay (with access of water). Room for expansion behind the support is used in cases of heavy swelling. Drainage measures are used where possible.
- IX. Cases not involving swelling clay or squeezing rock.
- X. Cases involving squeezing rock. Heavy rigid support its generally used as permanent support.
- XI. According to the authors’ experience, in cases of swelling or squeezing, the temporary support required before concrete (or shotcrete) arches are formed may consist of bolting (tensioned shell-expansion type) if the value of RQD/J_n is sufficiently high (i. e. >1.5), possibly combined with shotcrete. If the rock mass is very heavily jointed or crushed (i. e. $RQD/J_n < 1.5$, for example a “sugar cube” shear zone in quartzite), then the temporary support may consist of up to several applications of shotcrete. Systematic bolting (tensioned) may be added after casting the concrete (or shotcrete) arch to reduce the uneven loading on the concrete, but it may not be effective when $RQD/J_n < 1.5$, or when a lot of clay is present, unless the bolts are grouted before tensioning. A sufficient length of anchored bolt might also be obtained using quick setting resin anchors in these extremely poor quality rock-masses. Serious occurrences of swelling and/or squeezing rock may require that the concrete arches are taken right up to the face, possibly using a shield as temporary shuttering. Temporary support of the working face may also be required in these cases.
- XII. For reasons of safety the multiple drift method will often be needed during excavation and supporting of roof arch. Categories 16, 20, 24, 28, 32, 35 ($SPAN/ESR > 15$ m only).
- XIII. Multiple drift method usually needed during excavation and support of arch, walls and floor in cases of heavy squeezing. Category 38 ($SPAN/ESR > 10$ m only).

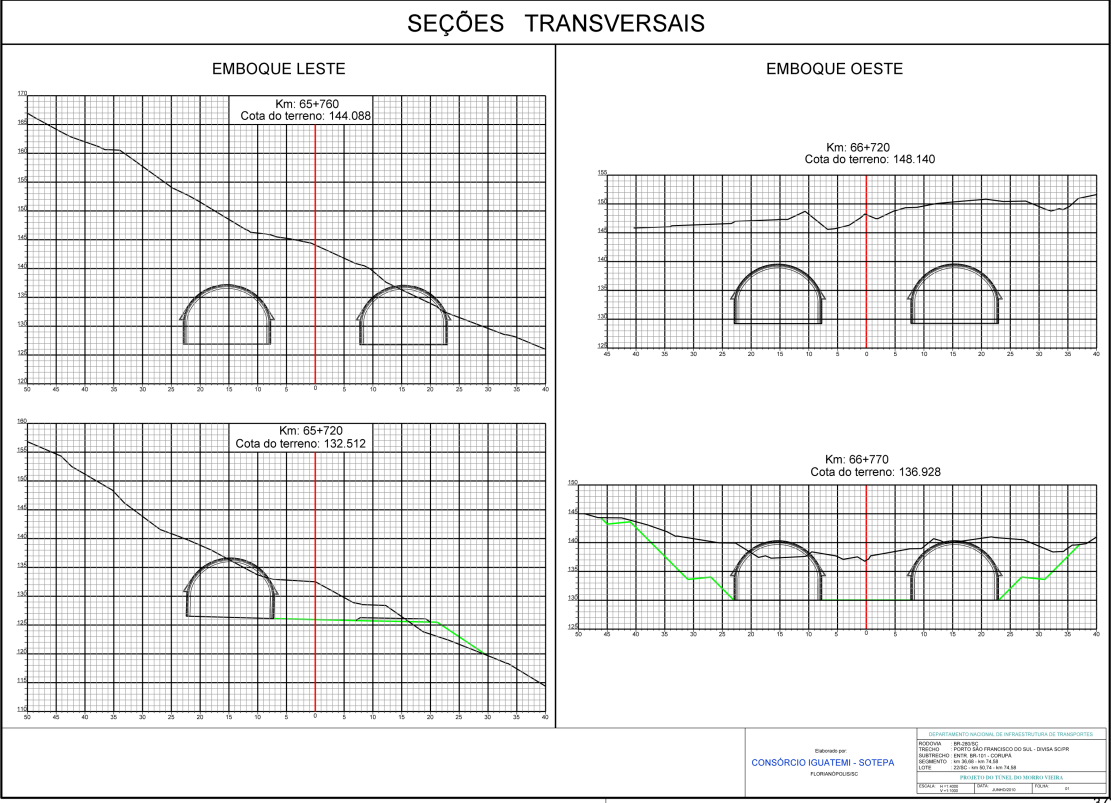
Fonte: BARTON; LIEN; LUNDE (1974).

.3 PROJETO DE TÚNEL BR-280/CORUPÁ





372



373



